



Contribution au pronostic de durée de vie des systèmes piles à combustible PEMFC

Rosa Elvira Silva Sanchez

► To cite this version:

Rosa Elvira Silva Sanchez. Contribution au pronostic de durée de vie des systèmes piles à combustible PEMFC. Energie électrique. Université de Franche-Comté; Université du Québec à Trois-Rivières, 2015. Français. NNT : 2015BESA2005 . tel-01335823

HAL Id: tel-01335823

<https://theses.hal.science/tel-01335823>

Submitted on 22 Jun 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Contribution au pronostic de durée de vie
des systèmes pile à combustible de type
PEMFC

■ ROSA ELVIRA SILVA SANCHEZ

THÈSE
PRÉPARÉE EN COTUTELLE ET PRÉSENTÉE CONJOINTEMENT À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À
TROIS-RIVIÈRES
INSTITUT DE RECHERCHE SUR
L'HYDROGÈNE
GROUPE DE RECHERCHE EN
ÉLECTRONIQUE
INDUSTRIELLE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE
ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE
INFORMATIQUE

ET À

L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-
COMTÉ
LABORATOIRE FEMTO-ST
(UMR CNRS 6174)
FÉDÉRATION DE RECHERCHE
FCLAB
(FR CNRS 3539)
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES
POUR L'INGÉNIEUR ET
MICROTECHNIQUES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
ROSA ELVIRA SILVA SANCHEZ

CONTRIBUTION AU PRONOSTIC DE DURÉE DE VIE DES SYSTÈMES PILE À
COMBUSTIBLE DE TYPE PEMFC

AVRIL 2016

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À
TROIS-RIVIÈRES**

DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
(PH.D.)

Programme offert par l'Université du
Québec à Trois-Rivières

**UNIVERSITÉ DE FRANCHE-
COMTÉ**

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE
FRANCHE-COMTÉ (SPÉCIALITÉ :
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR)

Programme offert par l'Université de
Franche-Comté

CONTRIBUTION AU PRONOSTIC DE DURÉE DE VIE DES SYSTÈMES PILE À
COMBUSTIBLE DE TYPE PEMFC

PAR
ROSA ELVIRA SILVA SANCHEZ

Cette thèse a été dirigée par :

Prof. Daniel Hissel, directeur de recherche	Université de Franche-Comté
Prof. Loïc Boulon, directeur de recherche	Université du Québec à Trois-Rivières
Dr. Samir Jemeï, co-directeur de recherche	Université de Franche-Comté
Prof. Kodjo Agbossou, co-directeur de recherche (membre invité)	Université du Québec à Trois-Rivières
Dr. Rafael Gouriveau, co-directeur de recherche (membre invité)	École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon

Jury externe d'évaluation de la thèse :

Prof. Jean Hamelin, président du jury	Université du Québec à Trois-Rivières
Prof. Christophe Berenguer, rapporteur	Grenoble-INP
Prof. Maxime Dubois, évaluateur externe	Université de Sherbrooke
Prof. Alain Bouscayrol, rapporteur	Université de Lille 1

Thèse soutenue le 21 mai 2015

Abstract

This thesis work aims to provide solutions for the limited lifetime of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems (PEM-FCS) based on two complementary disciplines :

A first approach consists in increasing the lifetime of the PEM-FCS by designing and implementing a Prognostics & Health Management (PHM) architecture. The PEM-FCS are essentially multi-physical systems (electrical, fluid, electrochemical, thermal, mechanical, etc.) and multi-scale (time and space), thus its behaviors are hardly understandable. The nonlinear nature of phenomena, the reversibility or not of degradations and the interactions between components makes it quite difficult to have a failure modeling stage. Moreover, the lack of homogeneity (actual) in the manufacturing process makes it difficult for statistical characterization of their behavior. The deployment of a PHM solution would indeed anticipate and avoid failures, assess the state of health, estimate the Remaining Useful Lifetime (RUL) of the system and finally consider control actions (control and/or maintenance) to ensure operation continuity.

In this context, this thesis work aims to design a prediction system based on a data-driven approach. The first stage requires the identification of information through a set of observations collected from sensors, more specifically : measuring the voltage of the stack, as an outcome of a long duration test at nominal operating conditions (1000 hours). Subsequently, develop data preprocessing techniques to extract or generate descriptors that will identify degradation mechanisms and quantify the damage events during the aging of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). Then, is designed a prognostic algorithm that can handle imprecise and uncertain data to estimate the RUL of the stack using an adaptive neuro-fuzzy inference system.

A second approach proposes to use a passive hybridization of the PEMFC with Ultra Capacitors (UC) to operate the fuel cell closer to its optimum operating conditions and thereby minimize the impact of aging. The UC appear as an additional source to the PEMFC due to their high power density, their capacity to charge/discharge rapidly, their reversibility and their long life. If we take the example of fuel cell hybrid electrical vehicles, the association between a PEMFC and UC can be performed using a hybrid of active or passive type system. The overall behavior of the system depends on both, the choice of the architecture and the positioning of these elements in connection with the electric charge. Today, research in this area focuses mainly on energy management between the sources and embedded storage and the definition and optimization of a power electronic interface designated to adjust the flow of energy between them. However, the presence of power converters increases the source of faults and failures (failure of the switches of the power converter and the impact of high frequency current oscillations on the aging of the PEMFC), and also increases the energy losses of the entire system (even if the performance of the power converter is high, it nevertheless degrades the overall system).

In this context, this thesis work aims to analyze the contributions of passive hybridization (without using a power converter) of a PEMFC with UC. The main interest is to analyze the electrical behavior experienced when connecting these elements and the management strategy. Simulations are presented to analyze the energy management between these sources when a load is connected. The operation of such a hybrid system when the UC is fully discharged (typically equivalent to a system startup after a sufficiently long shutdown) gives a particular interest on the fact that the initial current demanded to the fuel cell can achieve very high values. In this case, once the UC are connected, they are equivalent to a short-circuit, only limited by the internal resistance of the PEMFC and the UC. Note that this mode can also represent the case of a failure in the power converter with the switches held in closed position. These operating conditions are very similar, at least taking into account that the current peak occurs at the time of failure or direct connection. This original study, first conducted in simulation, will be in a second phase completed in an experimental study conducted on a complete stack. The experimental procedure consists in short-circuiting the electrodes of the PEMFC. Changes in performance of the fuel cell due to this type of current load will be

quantified using electrochemical impedance spectroscopy.

Keywords : proton exchange membrane fuel cell, prognostics and health management, passive hybridization, ultra capacitors, data driven approach, adaptive neuro fuzzy inference system.

Résumé

Les travaux de cette thèse visent à apporter des éléments de solutions au problème de la durée de vie des systèmes pile à combustible (FCS – Fuel Cell System) de type à “membrane échangeuse de protons” (PEM – Proton Exchange Membrane) et se décline sur deux champs disciplinaires complémentaires :

Une première approche vise à augmenter la durée de vie de celle-ci par la conception et la mise en œuvre d’une architecture de pronostic et de gestion de l’état de santé (PHM – Prognostics & Health Management). Les PEM-FCS, de par leur technologie, sont par essence des systèmes multi-physiques (électriques, fluidiques, électrochimiques, thermiques, mécaniques, etc.) et multi-échelles (de temps et d’espace) dont les comportements sont difficilement appréhendables. La nature non linéaire des phénomènes, le caractère réversible ou non des dégradations, et les interactions entre composants rendent effectivement difficile une étape de modélisation des défaillances. De plus, le manque d’homogénéité (actuel) dans le processus de fabrication rend difficile la caractérisation statistique de leur comportement. Le déploiement d’une solution PHM permettrait en effet d’anticiper et d’éviter les défaillances, d’évaluer l’état de santé, d’estimer le temps de vie résiduel du système, et finalement, d’envisager des actions de maîtrise (contrôle et/ou maintenance) pour assurer la continuité de fonctionnement.

Dans ce contexte, notre travail de thèse vise à concevoir un système de pronostic basé sur une approche guidée par les données. La première étape exige l’identification des informations via un ensemble d’observations recueillies à partir de capteurs, plus précisément : la mesure de la tension du stack, issue d’un essai en longue durée sur des conditions de fonctionnement nominales (1 000 heures). Par la suite, développer des techniques de pré-traitement des données afin d’extraire ou générer des descripteurs qui permettront d’identifier les mécanismes de

dégradation et de quantifier les dégradations advenant au cours du vieillissement de la pile à combustible (FC – Fuel Cell) de type PEM. Ensuite, un algorithme de pronostic capable de traiter des données imprécises et incertaines est conçu pour estimer le temps résiduel avant défaillance du stack à l’aide d’un système d’inférence adaptatif neuro-flou.

Une deuxième approche propose d’avoir recours à une hybridation passive de la PEMFC avec des super-condensateurs (UC – Ultra Capacitor) de façon à faire fonctionner la pile au plus proche de ses conditions opératoires optimales et ainsi, à minimiser l’impact du vieillissement. Les UCs apparaissent comme une source complémentaire à la PEMFC en raison de leur forte densité de puissance, de leur capacité de charge/décharge rapide, de leur réversibilité et de leur grande durée de vie. Si l’on prend l’exemple des véhicules à pile à combustible, l’association entre une PEMFC et des UCs peut être réalisée en utilisant un système hybride de type actif ou passif. Le comportement global du système dépend à la fois du choix de l’architecture et du positionnement de ces éléments en lien avec la charge électrique. Aujourd’hui, les recherches dans ce domaine se focalisent essentiellement sur la gestion d’énergie entre les sources et stockeurs embarqués ; et sur la définition et l’optimisation d’une interface électronique de puissance destinée à conditionner le flux d’énergie entre eux. Cependant, la présence de convertisseurs statiques augmente les sources de défaillances et pannes (défaillance des interrupteurs du convertisseur statique lui-même, impact des oscillations de courant haute fréquence sur le vieillissement de la pile), et augmente également les pertes énergétiques du système complet (même si le rendement du convertisseur statique est élevé, il dégrade néanmoins le bilan global).

Dans ce contexte, notre travail de thèse vise à analyser les apports de l’hybridation passive (sans recours à un convertisseur de puissance) d’un PEMFC par des UCs. L’intérêt principal consiste à analyser le comportement électrique subi lors de la connexion de ces éléments, ainsi que la stratégie de gestion naturelle. Des simulations sont présentées pour analyser la gestion naturelle d’énergie entre ces sources quand une charge est connectée. Le fonctionnement d’un tel système hybridé lorsque les UCs sont complètement déchargés (typiquement équivalent à un démarrage du système après une période d’arrêt suffisamment longue) suscite un intérêt particulier du fait que le courant initial demandé à la pile à combustible peut atteindre des valeurs très élevées. Dans ce cas, une fois que les UCs sont branchés, ils sont équivalents à un

court-circuit, uniquement limité par la résistance interne de la PEMFC et des UCs. À noter que ce mode de fonctionnement peut aussi représenter le cas d'une défaillance sur le convertisseur de puissance avec des interrupteurs maintenus en position fermée. Ces conditions opératoires sont tout à fait similaires, au moins en tenant compte du pic de courant produit au moment de la défaillance ou la connexion directe. Cette étude originale, tout d'abord menée en simulation, sera dans un deuxième temps, complétée par une étude expérimentale conduite sur un stack complet. La procédure expérimentale consiste à court-circuiter les électrodes de la PEMFC. L'évolution des performances de la pile à combustible, face à ce type de sollicitation en courant, sera quantifiée à l'aide de la spectroscopie d'impédance électrochimique.

Mots clés : pile à combustible à membrane échangeuse de protons, pronostic et gestion de l'état de santé, hybridation passive, super-condensateurs, approche basée données, système d'inférence adaptatif neuro-flou.

Avant-propos et remerciements

Ce travail s’inscrit dans le cadre d’une coopération scientifique et technologique (cotutelle internationale) entre l’Université de Franche-Comté en France et l’Université du Québec à Trois-Rivières au Canada. La thèse s’intitule : “Contribution au pronostic de durée de vie des systèmes pile à combustible de type PEMFC”. Le sujet de cette thèse, notamment dans son application au cas particulier des systèmes pile à combustible, est l’une des premières (à notre connaissance) dans le monde sur le sujet.

La préparation de la thèse a débuté au titre de l’année universitaire 2011/2012 : les premiers 18 mois de thèse ont été effectués au sein de l’équipe Systèmes Hybrides et Systèmes Pile à Combustible (SHPAC) du département ENERGIE de l’Institut de recherche FEMTO-ST et au sein de la Fédération de Recherche CNRS FCLAB à Belfort, France. Ce laboratoire est attaché au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), à l’Université de Franche-Comté, à l’Université Technologique de Belfort-Montbéliard et à l’École Nationale Supérieure de Micromécanique et Microtechnologie. L’équipe SHPAC a comme objectif scientifique de modéliser, d’analyser et de commander des systèmes hybrides électriques.

Ensuite, les derniers 24 mois de thèse ont été réalisés à l’Institut de Recherche sur l’Hydrogène (IRH) à Trois-Rivières, Canada. Cet institut est l’un des seuls au monde à se consacrer exclusivement à la recherche sur l’hydrogène en tant que vecteur énergétique. Sa mission est de promouvoir la science et la technologie pour la mise en place d’un système énergétique durable en utilisant l’hydrogène. Les activités de recherche et de développement menées par l’IRH sont essentiellement axées sur la production, le stockage, la sûreté de fonctionnement et l’utilisation de ce gaz.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de cette thèse. En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mon respect au Pr. Daniel HISSEL et Pr. Loïc BOULON, qui ont assuré la direction de ce travail. Je voudrais vous exprimer tout ma reconnaissance pour votre accompagnement scientifique, pour leur confiance, leur disponibilité et leurs encouragements.

J'adresse également ma reconnaissance au Pr. Kodjo AGBOUSSOU pour son implication dans le bon déroulement de ce travail. J'exprime mes sincères remerciements à Dr. Samir JEMEÏ et Dr. Rafael GOURIVEAU pour toutes les discussions fructueuses, les critiques constructives et l'aide considérable octroyée au contenu de cette thèse.

Je tiens à remercier les messieurs membres du jury : M. Jean HAMELIN, Professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury. M. Christophe BERENGUER, Professeur à l'Institut Polytechnique de Grenoble INP, d'avoir accepté avec M. Alain BOUSCAYROL, Professeur à l'Université de Lille 1, d'étudier mes travaux et d'en être les rapporteurs, ainsi que pour l'intérêt et le temps consacré à ce travail de thèse. En outre, je remercie à M. Maxime DUBOIS, Professeur à l'Université de Sherbrooke, pour les conseils et les remarques formulés au sujet du présent travail.

Des remerciements très spéciaux à Javier SOLANO, Fabien HAREL et Nadia STEINER pour la précieuse contribution apportée à ce travail, un grand merci pour m'avoir accordé leur temps et leur expertise, pour me guider à mener les essais du Projet DIAPASON phase 2, ainsi que les publications produits de ces travaux.

De manière générale, mes remerciements vont à tout le personnel du FCLAB ainsi que le personnel de l'IRH pour l'agréable ambiance de travail. Je remercie également mes collègues : David, Élodie, Mauricio, Neigel, Nilson, Pilar, Soichi, ... et à mes amis : Aka, Andrés, Antonella, Daniel, Joseba, Julien, Luisa ... avec qui j'ai partagé moments inoubliables pendant ces dernières années.

Pour conclure, je tiens à exprimer ma gratitude envers ma famille qui m'ont toujours soutenu et encouragé à poursuivre mes rêves. C'est à vous que je dédie cette thèse.

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Contexte général du projet de recherche	1
1.2	Problématique de recherche	7
1.2.1	Pronostic et gestion de l'état de santé des PEM-FCS	9
1.2.2	Hybridation entre une PEMFC et des UCs	10
1.3	Objectifs du projet de recherche	11
1.4	Méthodologie	13
1.5	Organisation de la thèse	13
2	Augmentation de la durée de vie des PEM-FCS	17
2.1	Le PEM-FCS vue comme un système complexe	18
2.1.1	Circuit d'alimentation anodique et cathodique	21
2.1.2	Circuit de refroidissement	23
2.1.3	Circuit électrique	24
2.1.4	Circuit de commande	28
2.2	Hybridation entre une PEMFC et des UCs	29
2.3	Pronostic et gestion de l'état de santé des PEM-FCS	33
2.3.1	Connaissance a priori des défaillances et mécanismes de dégradation	36
2.3.2	Module d'acquisition des données	38
2.3.3	Module de pré-traitement des données	40
2.3.4	Module de diagnostic / pronostic	41
2.3.5	Module d'aide à la décision	43

2.4	Classification des méthodes pour le PHM des PEM-FCS	45
2.4.1	Approches basées sur des modèles physiques	45
2.4.2	Approches guidées par les données	46
2.4.3	Approche hybride	48
2.5	Critères d'évaluation de la performance du pronostic	49
2.6	Enjeux et défis du PHM pour les PEM-FCS	53
2.6.1	Conception optimale des systèmes de capteurs	54
2.6.2	Sélection des méthodes applicables pour le PHM	54
2.6.3	Gestion de l'incertitude	55
2.6.4	Validation et vérification	55
2.7	Conclusion	56
3	Augmentation de la durée de vie des PEM-FCS en utilisant une approche logicielle : PHM	59
3.1	Mise en contexte	60
3.1.1	La stratégie Réursive	61
3.1.2	La stratégie Directe :	62
3.1.3	La stratégie DirRec :	63
3.1.4	La stratégie MIMO	63
3.1.5	La stratégie MISMO	64
3.2	Systèmes d'inférence neuro-flous adaptatifs	65
3.3	Hypothèses de travail	68
3.4	Acquisition des données de la PEMFC	69
3.5	Techniques pour le pré-traitement du signal original	69
3.5.1	Décomposition du signal original en deux composantes	70
3.6	Description du modèle de prédiction	71
3.6.1	Définition des entrées et sorties du système	71
3.6.2	Organisation des données	72
3.6.3	Apprentissage et prédiction	73
3.7	Cas d'étude	75

3.8	Critères d'évaluation de la performance	76
3.9	Résultats de simulation et discussion	77
3.9.1	Analyse de sensibilité paramétrique	80
3.10	Conclusion	82
4	Augmentation de la durée de vie des PEM-FCS en utilisant une approche matérielle : hybridation directe	87
4.1	Mise en contexte	88
4.2	Simulation de l'hybridation passive PEMFC/UC	94
4.2.1	Interconnexion entre la source PEMFC et l'ensemble d'UCs	96
4.2.2	Configuration PEMFC/UC/Charge	101
4.3	Étude de la dégradation d'une PEMFC soumise à tenues de courant élevé	104
4.3.1	Caractéristiques de la pile à combustible considérée et du banc d'essai	105
4.3.2	Procédure du court-circuit	107
4.3.3	Résultats et analyse du comportement électrique	108
4.3.4	Résultats et analyse du comportement thermique et fluide	109
4.3.5	Résultats et analyse du comportement dynamique via spectroscopie d'impédance électrochimique	113
4.4	Conclusion	116
5	Conclusions et Perspectives	119
5.1	Discussions	119
5.2	Perspectives et travaux futurs	122
A	Modèle de la pile à combustible	137
B	Liste de publications	143

Liste des tableaux

2.1	Mesures de pronostic [1–3]	49
2.2	Mesures de performances du système de pronostic [1,4]	51
2.3	Indicateurs du coût-bénéfice	53
3.1	Organisation des données pour l'étape d'apprentissage	73
3.2	Paramètres du modèle utilisés dans la phase d'apprentissage	76
3.3	Récapitulatif des meilleurs résultats pour la prédiction de la tension du stack 1	79
3.4	Récapitulatif des meilleurs résultats pour la prédiction de la tension du stack 2	79
4.1	UC1 (Nominal 470 F) extrait à partir de [5]	97
4.2	Bilan énergétique de la charge des UC1	98
4.3	UC2 (Nominal 583 F) extrait à partir de [6]	99
4.4	Bilan énergétique de la charge des UC2	100
4.5	Résistances ohmiques : R_m m Ω . Avant et après court-circuit (10 s)	114
4.6	Résistances de polarisation : R_p m Ω . Avant et après court-circuit (10 s)	115
A.1	Équations régissant le modèle de la PEMFC	141

Table des figures

1.1	Les enjeux du développement durable [7]	2
1.2	Chemin vers le succès commercial pour répondre aux objectifs 2050 [8]	6
1.3	Synthèse de la problématique de recherche	12
2.1	Les sous-systèmes d'une PEMFC à basse température	19
2.2	Représentation schématique des modes de défaillance dans une PEMFC [9]	21
2.3	Diagramme de Ragone pour différents sources de stockage d'énergie [10]	30
2.4	Schéma conceptuel de la chaîne de traction d'un FC-HEV	31
2.5	Détection, diagnostic et pronostic : les aspects phénoménologiques	35
2.6	Architecture du processus du PHM pour un PEM-FCS	37
2.7	Organigramme de l'approche hybride [11]	48
2.8	Mesures de pronostic	49
2.9	Indicateurs pour mesurer la performance des algorithmes de pronostic [12]	50
2.10	Mesures de performances du système de pronostic [1]	52
2.11	Étapes systématiques pour l'analyse coût-bénéfice [2, 13]	53
3.1	Structure du système d'inférence neuro-flou adaptatif	66
3.2	Tension du stack 1	70
3.3	Tension du stack 2	70
3.4	Décomposition du signal de référence en deux composants, V_{FC1}	71
3.5	Structure des entrées/sortie classique, avec 3 régresseurs, $N=4$	72
3.6	Exemple d'une structure itérative ($N = 3$, $\alpha = \beta = 1$, et $H = 17$)	74
3.7	Structure des entrées/sortie modifiée, avec $N=d=4$	75

3.8	Prédiction tension du stack 1	78
3.9	Prédiction tension du stack 2	78
3.10	Prédiction de performances vs α , $N = 4$, $MF = 3$	81
3.11	Erreur en fonction de $H V_{FC1}$	84
3.12	Erreur en fonction de $H V_{FC1f}$	85
4.1	Différents architectures du système de puissance hybride active PEMFC/UC . .	90
4.2	Architecture du système de puissance hybride passive PEMFC/UC	92
4.3	Hybridation passive PEMFC/UC	96
4.4	Modèle du circuit équivalent UC	96
4.5	État de charge initial $SOC_{UC1} = 0\%$ (démarrage à $t=10$ s)	97
4.6	État de charge initial $SOC_{UC2} = 0\%$ (démarrage à $t=10$ s)	99
4.7	Résultats de simulation lors de l'hybridation passive PEMFC/UC/Charge . . .	102
4.8	Résultats de simulation lors de l'hybridation passive PEMFC/UC/Charge (zoom)	103
4.9	Hybridation passive PEMFC/UC/Charge pour différents valeurs d'UCs	104
4.10	Banc d'essai 5 kW développé au FCLAB	106
4.11	Schéma du montage permettant le court-circuit	107
4.12	Comportement électrique de la PEMFC pendant le court-circuit	109
4.13	Comportement fluide et thermique de la PEMFC pendant le court-circuit . .	110
4.14	Diagrammes de Nyquist relevés dans des conditions de fonctionnement nominales	115
A.1	Éléments constitutifs du formalisme EMR [6]	138
A.2	EMR système pile à combustible [6]	140

Liste des symboles

Abréviations

AHP	Analytical Hierarchy Process	Méthode d'analyse multicritère
AM	Arithmetic Mean	Moyenne arithmétique
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Inference System	Système d'inférence neuro-flou adaptatif
DOE	Department of Energy	Département de l'énergie des États-Unis
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy	Spectroscopie d'impédance électrochimique
EMR	Energetic Macroscopic Representation	Représentation énergétique macroscopique
EVI	Electric Vehicles Initiative	Initiative véhicules électriques
EV	Electrical Vehicles	Véhicules électriques
FC	Fuel Cell	Pile à combustible
FCS	Fuel Cell System	Système pile à combustible
HEV	Hybrid Electrical Vehicles	Véhicules hybrides électriques
IEA	International Energy Agency	Agence Internationale de l'Énergie
LCC	Life Cycle Cost	Coût du cycle de vie
MAPE	Mean Absolute Percent Error	Erreur absolue moyenne en %
MF	Membership Function	Fonction d'appartenance
MSP	Multi-Steps ahead Prediction	Prédictions à plusieurs pas
PA	Amortization Period	Période d'amortissement
PDF	Probability Density Function	Fonction densité de probabilité
PEM	Proton Exchange Membrane	Membrane échangeuse de protons
PHM	Prognostics & Health Management	Pronostic et gestion de l'état de santé

Abréviations

RMSE	Root Mean Square Error	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
ROI	Return On Investment	Retour sur investissement
RUL	Remaining Useful Lifetime	Temps de vie résiduel du système
R^2	Coefficient of determination	Coefficient de détermination
SOC	State Of Charge	État de charge
SOH	State Of Health	État de santé
UC	Ultra Capacitor	Super-condensateur
WT	Wavelet Transform	Transformée en ondelettes

Lettres Grecques

α	Input prediction step	Pas de prédiction en entrée
β	Output prediction step	Pas de prédiction en sortie
σ	Standard deviation	Écart type
Θ	Set including all necessary F parameters	Ensemble des paramètres nécessaires pour F

Lettres Romaines

H	Final prediction horizon	Horizon de prédiction final
F	Prediction model	Modèle de prédiction
N	Number of inputs	Nombre d'entrées
$N_{\text{cell}_{\text{FC}}}$	Number of cells in the PEMFC	Nombre de cellules de la PEMFC
$N_{\text{cell}_{\text{UC}}}$	Number of cells in the UC	Nombre de cellules des UCs
S_t	Univariate time-series	Série temporelle unidimensionnelle
t	Time index	Indice temporel
trn_{data}	Number of learning data samples	Nombre de données d'apprentissage
y_i	i^{th} value of S_t	$i^{\text{ème}}$ valeur de S_t
\hat{y}_i	i^{th} predicted value of S_t	$i^{\text{ème}}$ valeur prédite de S_t
y_{t+1}	One-step ahead prediction	Prédiction à un pas (estimation)
y_{t+H}	Final-step ahead prediction	Prédiction à H pas (estimation finale)

Chapitre 1

Introduction générale

Ce chapitre décrit la motivation et le contexte général du sujet de recherche, positionne la problématique industrielle liée aux systèmes pile à combustible (FCS – Fuel Cell System) de type à “membrane échangeuse de protons” (PEM – Proton Exchange Membrane) et met en évidence le besoin de développer stratégies permettant la prolongation de la durée de vie de ces systèmes. Dans ce contexte, deux solutions sont abordées : la conception et la mise en œuvre d’un module de surveillance permettant de suivre l’état de santé (SOH – State Of Health) et d’estimer le temps de vie résiduel du système ; et l’étude d’une architecture d’hybridation physique sans convertisseur de la pile à combustible avec des super-condensateurs (UC – Ultra Capacitor). Finalement, ce premier chapitre se conclut par la présentation des objectifs de recherche et la méthodologie suivie tout au long du déroulement du travail de recherche.

1.1 Contexte général du projet de recherche

Le transport de personnes et de marchandises est l’un des axes de développement de l’économie et de la société, et représente plus d’un quart de la consommation d’énergie au niveau mondial. Les systèmes de transport (routier, ferroviaire, naval, aérien) influent beaucoup sur la qualité de vie des citoyens et dans les prochaines années ils devront faire face à de nombreux enjeux : la dépendance aux énergies fossiles, le coût croissant de l’énergie, la sécurité routière, la congestion des métropoles et l’impact environnemental, entre autres. Le système de transport tel qu’on le connaît aujourd’hui est ainsi contraint de s’adapter pour faire face

aux enjeux du développement durable. Concevoir un système de mobilité performant et durable doit répondre aux besoins des utilisateurs d'une façon sécuritaire et sur une base d'équité intergénérationnelle, sans oublier les enjeux techniques, économiques et environnementaux. La Figure 1.1 nous présente le concept et les dimensions du développement durable.

Le secteur de la recherche scientifique est un élément incontournable dans le développement du transport durable. Il doit apporter des solutions économiquement viables, innovantes et propres. Parmi les axes de recherche qui doivent être soutenus, on peut citer la diversification des sources d'énergie, l'optimisation de la conversion d'énergie ou la conception de dispositifs d'aide à la conduite économe. La mise en place et la gestion de modes de transport incitant à l'efficacité énergétique et plus généralement à la baisse des consommations à forte empreinte carbone, représente une initiative qui mérite d'être soutenue. Dans cet esprit, le développement de nouvelles filières énergétiques comme celle employant le vecteur hydrogène et l'utilisation des véhicules à pile à combustible (FC-HEV – Fuel Cell Hybrid Electrical Vehicles) semble prometteur.

L'hydrogène comme carburant n'existe pas à l'état naturel. Il est un vecteur énergétique. L'hydrogène est le plus léger, le plus simple, et l'un des éléments les plus abondants dans

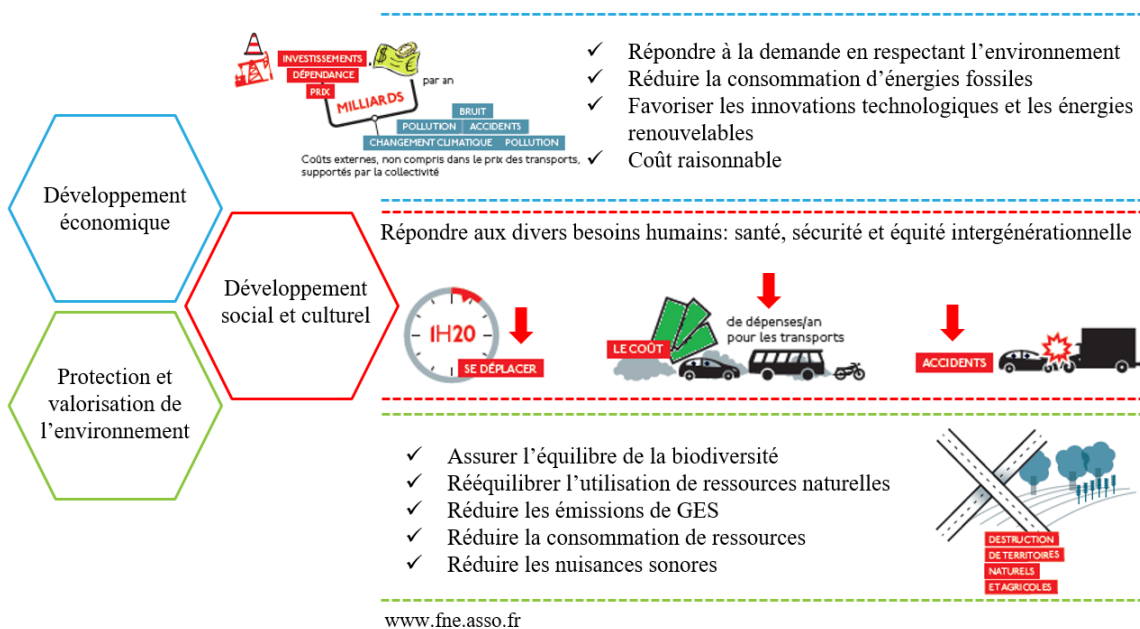


Figure 1.1 – Les enjeux du développement durable [7]

la nature. Ces caractéristiques font de l'hydrogène un candidat idéal pour un futur système énergétique durable basé sur des énergies renouvelables. De manière générale, l'utilisation de l'hydrogène contribue à atténuer le changement climatique, favorise la réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O , CH_4 , HFC), dont le CO_2 est le principal et représente à lui seul plus de 95 % des émissions dans le secteur des transports [14], réduit la dépendance à l'égard des importations d'énergie et améliore la qualité de l'air local. Néanmoins, certains verrous technologiques restent à lever dans le développement des technologies requises pour la production, le stockage et la distribution de l'hydrogène. Au niveau mondial, divers pays ont lancé des programmes d'infrastructures d'alimentation en hydrogène en 2012 et 2013, afin de faciliter l'essor du commerce des FC-HEV en 2015. 27 nouvelles stations de ravitaillement en hydrogène ont été ouvertes dans le monde en 2012, portant le nombre total de stations en fonctionnement à 208. Les stations sont situées en Europe (80), Amérique du Nord (76), Asie (49) et le reste du monde (3) [15]. Il est à noter que la Fédération de Recherche CNRS FCLAB en France et l'IRH au Canada comptent une station de ravitaillement en hydrogène dans leurs installations.

Une pile à combustible (FC – Fuel Cell) est un convertisseur direct d'énergie qui convertit l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique, chaleur et autres produits de réaction (eau notamment). Du point de vue de ses composants, les FCs sont classifiées selon le type d'électrolyte utilisé, et du point de vue de fonctionnement, les FCs sont classifiées par le type de combustible qui peut être utilisé et la température de fonctionnement. Parmi les différents types de FC, les piles de type PEM, à basse température : de l'ordre de 60 à 80 °C, demeurent les plus appropriées pour la future génération de véhicules, notamment du fait de leur haute efficacité énergétique, faibles émissions, capacité de démarrage rapide, haute densité d'énergie volumique¹, et haute densité de puissance massique². Plusieurs constructeurs automobiles (parmi lesquels Toyota, Hyundai, Daimler Chrysler, Ford, Honda . . .) ont annoncé une commercialisation pour 2015. Cependant, la Hyundai ix35 et la Toyota Mirai sont les premiers véhicules alimentés à l'aide d'une PEMFC qui sont actuellement sur le marché et

1. La densité d'énergie volumique, en wattheure par litre ($\text{Wh} \cdot \text{L}^{-1}$), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de volume d'accumulateur, elle sert à définir son autonomie.

2. La densité de puissance massique, en watt par kilogramme ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$), représente l'énergie électrique fournie par unité de temps que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur, ce qui donne une idée de la capacité de la source à fournir de la dynamique au véhicule.

depuis fin 2014 sont offerts aux clients dans les zones qui ont accès à une infrastructure pour le ravitaillement en hydrogène.

À titre d'exemple, l'Initiative Véhicules Électriques (EVI – Electric Vehicles Initiative) a été lancée en 2010 lors de la réunion ministérielle sur les énergies propres (Clean Energy Ministerial), comme une plateforme de coopération mondiale dédiée à accélérer l'introduction et l'adoption des véhicules électriques (EV – Electrical Vehicles) et des véhicules hybrides électriques (HEV – Hybrid Electrical Vehicles) dans le monde entier. EVI vise à faciliter le déploiement mondial d'au moins 20 millions d'EV à l'horizon 2020. EVI comprend actuellement huit pays (Chine, France, Allemagne, Japon, Afrique du Sud, l'Espagne, la Suède et les États-Unis). On peut noter la participation de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA – International Energy Agency).

Au niveau européen, l'hydrogène et les piles à combustible bénéficient d'un fort soutien de la Commission européenne à travers les initiatives conjointes partenariat public/privé, (FCHJU – Fuel Cells Hydrogen & Joint Undertaking), lancées en 2008 et confirmées en 2014 jusqu'à 2020. L'objectif de ce partenariat est de mettre en œuvre un programme d'activités de recherche, de développement technologique et de démonstration afin d'accélérer le développement et la commercialisation des technologies de l'hydrogène et des FCs.

La France s'est engagée sur la voie de la mobilité durable, au travers de la mise en œuvre de stratégies gouvernementales tels que la loi sur l'air de 1996 qui prend en compte des mesures techniques de prévention de la pollution atmosphérique et d'utilisation rationnelle de l'énergie pour les véhicules. Le Grenelle de l'Environnement promulgué en 2010, a fixé un objectif de réduction de la moyenne des émissions du parc automobile français pour les ramener au niveau de 1990, de $176 \text{ gCO}_2 \cdot \text{km}^{-1}$ à $130 \text{ gCO}_2 \cdot \text{km}^{-1}$ à l'horizon 2020 [16]. L'Association Française pour l'HYdrogène et les Piles À Combustible (AFHYPAC) est déterminée à développer et faire reconnaître au niveau national et international la filière française de l'hydrogène et des piles à combustible, afin de favoriser la transition énergétique, notamment dans le domaine de la mobilité. De plus, le Groupement de Recherche “Hydrogène, Systèmes et Piles à Combustible” GDR HySPAC rassemble plus d'une centaine d'équipes de recherche travaillant dans le domaine de l'hydrogène. Leur but est d'unir et de coordonner les efforts, ainsi que de faciliter la diffusion des connaissances sur les recherches actuelles pour la production et le stockage de

l'hydrogène, des FCS et des FCs.

Le Programme Investissements d'Avenir soutien le développement de la filière hydrogène par le biais de la création d'infrastructures de ravitaillement. La Lorraine, par exemple, a lancé un projet de "route de l'hydrogène" reliant la France, l'Allemagne et le Luxembourg. **F-CityH2** premier FC-HEV immatriculé en France (décembre 2011), constitué d'un module FC et un stockage d'énergie sous forme d'hydrogène dans une EV à batterie lithium permet de multiplier par plus de trois sa capacité énergétique avec l'avantage d'une recharge de quelques minutes. La Poste est le porteur de deux projets, au titre d'utilisateur : le projet **Mobilhytest** qui fait appel à l'utilisation de deux flottes captives de véhicules à prolongateur d'autonomie fonctionnant à l'hydrogène, et le projet **MobyPost** où un système complet associant un FC-HEV à une infrastructure de production, stockage et ravitaillement en hydrogène est conçu. La production d'hydrogène s'effectue à partir d'énergie solaire. Ces projets s'appuient sur des recherches menées au sein de la Fédération de Recherche CNRS FCLAB. Le laboratoire mobile d'Évaluation de Composantes de la Chaine Électrique (**ECCE**), a été conçu au sein de la Fédération de Recherche CNRS FCLAB, avec le soutien de nombreux partenaires publics et privés, dans le but d'évaluer, dans des conditions d'utilisation réelles, les différentes composantes énergétiques utilisées dans les HEV.

Au Canada, l'état de l'industrie est à l'avant-garde dans la fabrication des FCs, et en matière de développement de technologie pour la production, purification et le stockage d'hydrogène. En 2003, le gouvernement du Canada a lancé plusieurs initiatives centrées sur l'économie de l'hydrogène, le programme des adhérents pionniers de l'hydrogène (**Aph2**) d'Industrie Canada, un programme de contributions pour le soutien de projets pilotes sur les technologies de l'hydrogène [17]. Les membres du Comité canadien sur l'hydrogène et les FCs (**CH2PC**), de concert avec les intervenants des provinces, de l'industrie, et du milieu universitaire, surveillent les mesures et initiatives mises en œuvre par le gouvernement fédéral dans le secteur ; et représentent le Canada au sein de plusieurs partenariats stratégiques internationaux tels que le Partenariat international pour l'économie de l'hydrogène et l'IEA, pour assurer la commercialisation de la technologie à grande échelle.

La société Ballard est reconnue depuis longtemps comme une icône canadienne en matière de technologie mobile à l'hydrogène au niveau mondial, elle conçoit et fabrique PEMFC

stacks ainsi que des systèmes complets pour véhicules automobiles (notamment, des autobus hybrides à PEMFC), UAV's/Aerospace, scooters, systèmes électroniques, entre autres. Dans le cadre d'un partenariat public-privé, Ballard a participé à la mise en œuvre du projet pilote dénommé "l'autoroute de l'hydrogène en Colombie-Britannique". Le projet a eu pour but la création d'un réseau d'hydrogène adapté au "monde réel" pour mettre en évidence et sensibiliser vers l'acceptation des technologies de l'hydrogène au sein de la population. Un des objectifs secondaires était de présenter une réussite technologique canadienne dans le cadre des Jeux olympiques d'hiver de 2010 à Vancouver [17].

Le Canada et les États-Unis ont été les premiers pays en 1993 à mettre sur la route des autobus alimentés par FCs. Actuellement, il participe à plusieurs projets en cours de démonstration à l'étranger, par exemple : les programmes Transport Urbain Propre pour l'Europe (**TUPE**) et Systèmes de Transport Urbain Ecologique (**STUE**) réalisés par l'Union européenne, qui portent sur 30 autobus répartis dans dix villes ; le programme "Sustainable Transport Energy for Perth" (**STEP**) réalisé par l'Australie-Occidentale, qui porte sur trois autobus dans la ville de Perth ; le programme des autobus à FC réalisé à Beijing par le Programme des Nations Unies pour le développement et le Fonds pour l'environnement mondial. L'IRH est chef de file contribuant grandement aux efforts du réseau de recherche stratégique du CRSNG sur l'hydrogène (**H2CAN**) pour surmonter les obstacles techniques à l'introduction des technologies de l'hydrogène. La mise au point de ces technologies s'articule autour des activités portant sur la production et la purification ; le stockage ; et l'infrastructure et la sécurité de l'hydrogène.

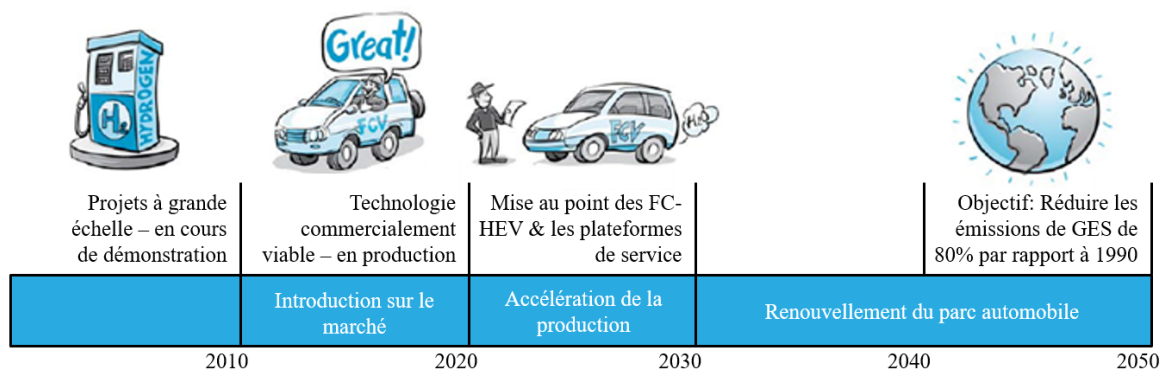


Figure 1.2 – Chemin vers le succès commercial pour répondre aux objectifs 2050 [8]

Actuellement, la technologie FC est au début de la phase de commercialisation. Le marché des PEMFC pourrait être important après 2020, mais d'ici là, il sera confronté à d'importants obstacles liés au développement et à l'adoption de la technologie. La Figure 1.2 présente le chemin vers le succès commercial pour répondre aux objectifs 2050 (extrait à partir de [8]).

1.2 Problématique de recherche

À ce jour, la faisabilité technique et le potentiel économique des PEM-FCS ont été démontrés à travers le monde dans de nombreuses applications stationnaires et transport. Néanmoins, les verrous technologiques et scientifiques qui limitent aujourd'hui l'arrivée sur le marché à grande échelle et à prix compétitif des PEM-FCS, pour les applications transport, résident dans son coût assez élevé, la durée de vie et le rendement électrique encore limités [18–20]. Au-delà, il reste également à s'intéresser au déploiement d'une filière propre d'hydrogène (production, distribution et stockage) et à l'élaboration d'un système de réglementation global sans lequel l'utilisation massive de PEM-FCS ne pourra être. Pour réduire le facteur coût, des ruptures technologiques sur les matériaux du cœur de pile doivent être réalisées, mais aussi des progrès sur le rendement du système (auxiliaires dédiés à la technologie PEMFC et à la valorisation de la chaleur) et des stratégies de fonctionnement adaptées (pour réduire les dégradations du stack et augmenter le rendement total) sont nécessaires.

Des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années. Néanmoins, les objectifs du Département de l'Énergie des États-Unis (DOE – Department of Energy) en termes de durabilité et de coût sont d'arriver à plus de 5 000 heures de fonctionnement et un coût de 40 \$·kW⁻¹ en 2020 pour un véhicule léger. Or aujourd'hui, la technologie PEMFC offre une durée de vie d'environ 3 000 heures en fonctionnement réel et une projection de coût (basée sur une production à grande échelle de 500 000 unités par an) de 55 \$·kW⁻¹ pour un PEM-FCS basse température [21]. La durabilité des PEMFC est affectée par de multiples facteurs tels que la conception du stack et son assemblage, la dégradation des matériaux, les conditions opératoires, les impuretés et les contaminants [18, 22, 23]. À ce jour, les FCs, même produites en série, ne présentent pas une fabrication homogène : chaque PEMFC présente un profil de dégradation unique basé sur les conditions d'opération et l'historique de fonctionnement.

Il existe quatre configurations possibles lorsque l'on utilise un PEM-FCS dans un véhicule automobile :

- Le PEM-FCS est la seule source d'énergie. Dans ce cas, elle fournit la totalité de la puissance électrique nécessaire, et fonctionne pour l'essentiel en conditions de charge partielle. Comme mentionnée par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) [24], la principale contrainte pour une PEMFC embarquée dans un véhicule est de ne jamais fonctionner en mode "nominal"³ : la PEMFC est soumise en continu à des variations de puissance (i.e. de 0 à 80 kW) correspondant à toutes les situations entre l'arrêt du véhicule et une accélération à pleine charge. Ces variations influencent fortement la tenue dans le temps et les performances des composants de la PEMFC, en particulier le cœur de pile. De plus, cette solution rend impossible à l'heure actuelle la récupération d'énergie de freinage, pour une application embarquée. De fait, cette solution est à proscrire à bord d'un EV ;
- Une autre source de puissance est associée au PEM-FCS, formant un système hybride. Dans ce cas, la PEMFC produit de l'énergie électrique et fonctionne dans une plage étroite où son rendement est très élevé. Lorsqu'une plus grande puissance est nécessaire, ou lorsque les transitoires de puissance sont très rapides par rapport aux dynamiques disponibles de la pile, la source d'énergie auxiliaire est capable d'aider la PEMFC à fournir la puissance de sortie nécessaire. Cette hybridation permet également de récupérer l'énergie de freinage et de pallier les défaillances réversibles dans le PEM-FCS. Une stratégie de gestion d'énergie doit ici contrôler la distribution de puissance fournie par le système hybride ;
- La PEMFC vue comme un "prolongateur d'autonomie", cette configuration procure une solution pour couvrir les longs trajets, en effet, le rechargement du système de stockage s'effectue par la PEMFC dès que le niveau de charge descend en dessous d'un seuil défini. Ici, le dimensionnement de la PEMFC est limité au cahier des charges du véhicule, où la valeur de puissance maximale dépend de la vitesse moyenne du véhicule ;
- Le PEM-FCS joue le rôle de "groupe auxiliaire de puissance", fournissant à un véhicule

3. L'état de fonctionnement nominal correspond à la mise en fonctionnement du système sous conditions qui correspondent aux paramètres tels que spécifiés par le fabricant et auxquels des tolérances ont été appliqués.

équipé d'une motorisation thermique classique une puissance électrique supplémentaire. Cette configuration peut permettre des économies substantielles de carburant dans les véhicules nécessitant beaucoup d'énergie électrique pour les auxiliaires (par exemple véhicules frigorifiques).

Dans tous les cas ci-dessus mentionnés, le fonctionnement de la PEMFC entraîne une dégradation qui implique une réduction de la tension, puis une perte de rendement à cause de la diminution de puissance. À ce jour, les mécanismes impliqués dans cette dégradation ne sont pas encore complètement connus et maîtrisés, les différents mécanismes sont en outre fortement corrélés et certains inévitables. De nouvelles découvertes scientifiques sont nécessaires dans le développement des matériaux, des modèles analytiques, et des outils permettant de suivre le SOH et d'estimer le temps restant de bon fonctionnement du système. Plus précisément, en ce qui concerne les applications automobiles, les PEM-FCS doivent faire face aux variations fortes de puissance, et/ou transitoires rapides et fréquents et ont un besoin de fiabilité renforcé. L'utilisation du PEM-FCS comme la seule source d'énergie ne peut répondre durablement à ce type de charge, les dynamiques couplées au fort courant et faible tension dans la pile influent fortement les performances des composants du système, en particulier au cœur de pile, entraînant ainsi tout à la fois une dégradation d'efficacité énergétique en fonctionnement et une réduction significative de la durée de vie.

Dans cette perspective, la problématique liée aux travaux de cette thèse porte sur la prolongation de la durée de vie des PEM-FCS et se décline sur deux aspects suivants : le pronostic de durée de vie résiduelle, de manière à pouvoir envisager des actions en vue de l'augmentation de celle-ci ; et l'hybridation de l'objet "pile à combustible" avec des éléments de stockage d'énergie électrique, de manière à lisser les contraintes demandées à la pile à combustible.

1.2.1 Pronostic et gestion de l'état de santé des PEM-FCS

Une première façon d'envisager l'augmentation de la durée de vie des PEM-FCS consiste à s'intéresser aux mécanismes de dégradation, à la conception et la mise en œuvre d'une architecture de pronostic et gestion de l'état de santé (PHM – Prognostics & Health Management). Les PEM-FCS, de par leur technologie, sont par essence des systèmes multi-physiques (électriques, fluidiques, électrochimiques, thermiques, mécaniques, etc.) et multi-échelles (de temps

et d'espace) dont les comportements sont difficilement appréhendables. La nature non linéaire des phénomènes, le caractère réversible ou non des dégradations, et les interactions entre composants rendent effectivement difficile une étape de modélisation des défaillances. De plus, le manque de fiabilité (actuel) dans les qualités de fabrication rend difficile la caractérisation statistique de leur comportement. Tout ceci conduit à considérer le développement d'un système PHM comme un levier pour faire face à la problématique de durabilité des PEMFC. Le déploiement d'une solution PHM permettrait en effet d'anticiper et d'éviter les défaillances, d'évaluer le SOH, d'estimer le temps de vie résiduel du système (RUL – Remaining Useful Lifetime), et finalement, sur la base de telles informations, il deviendra possible d'envisager des actions de maîtrise (contrôle et/ou maintenance) pour assurer la continuité de fonctionnement du PEM-FCS.

L'objectif derrière la mise en œuvre d'une architecture PHM, comprend la surveillance dynamique de l'état du système en vue d'une maintenance de type prévisionnelle. Dans ce sens, l'activité de pronostic est considérée comme un processus clef : contrairement au diagnostic qui fait référence à la capacité de détecter et isoler la cause d'un dysfonctionnement qui a déjà eu lieu, le pronostic a la capacité de prédire l'évolution de la dégradation ou les défaillances futures d'un système : il apporte une garantie de fonctionnement du système et, de ce fait, constitue une étape importante avant de pouvoir définir les différents scénarios de maintenance applicables pour anticiper et prévenir les dysfonctionnements.

Évaluer l'état actuel et l'évolution future du PEM-FCS fournit des informations qui peuvent être utilisées pour répondre à plusieurs objectifs, parmi lesquels : donner une alerte à l'avance sur possibles défaillances ; minimiser la maintenance non planifiée ; maintenir l'efficacité du système en dépit d'un changement anormal de son état opérationnel, à travers d'actions de réparation et en temps opportun ; réduire le coût du cycle de vie du système, en diminuant les coûts de maintenance et les temps d'arrêt imprévus.

1.2.2 Hybridation entre une PEMFC et des UCs

Une seconde façon d'aborder la thématique de l'augmentation de la durée de vie des PEM-FCS, distinct mais fortement reliée au processus PHM, consiste à s'intéresser à leur hybridation avec des objets présentant une cyclabilité particulièrement importante : i.e. des UCs. Dans

une FC-HEV, l'association entre une PEMFC et des UCs peut être réalisée en utilisant un système hybride de type actif ou passif. Le comportement global du système dépend à la fois du choix de l'architecture et du positionnement de ces éléments en lien avec la charge électrique. L'architecture active a besoin au moins d'un convertisseur DC/DC pour effectuer la gestion de l'énergie. Actuellement, les recherches sur le domaine de l'électronique de puissance se focalisent essentiellement sur la gestion d'énergie entre les sources embarquées dans ces véhicules à travers la mise en place d'une interface électronique de puissance destinée à conditionner le flux d'énergie entre eux (i.e. FCS, UCs, batteries ...). Cependant, les topologies de convertisseurs de puissance proposées dans la littérature [25–30] démontrent que l'influence du convertisseur de puissance est déterminante sur le vieillissement et la production de défaillances dans les PEM-FCS (de par les interrupteurs statiques présents dans les convertisseurs statiques eux-mêmes, de par l'impact des oscillations de courant haute fréquence sur le vieillissement de la pile), et augmente les pertes énergétiques du système. Dans ce contexte, notre travail de thèse vise à exploiter cette fonctionnalité au travers de l'exploration d'une architecture d'hybridation de type passif ou sans recours à un convertisseur.

Pour conclure, nous présentons sur la Figure 1.3 le cadre de travail et la synthèse de la problématique de recherche. Compte tenu que les travaux présentés dans cette thèse sont des contributions visant à l'augmentation de la durée de vie des PEM-FCS. La solution logicielle, basée sur la mise en œuvre d'un algorithme PHM trouve sa pertinence dans la faible homogénéité des séries de PEMFC commercialisées. En effet, les processus de fabrication actuels ne permettent pas d'atteindre les mêmes performances et le même comportement entre les différentes piles d'une même série (et donc, supposément identiques). Quant à elle, la solution matérielle de l'hybridation passive se justifie par le fort taux de défaillances liées à l'électronique de puissance dans un système opérationnel. Ainsi, les aspects logiciel et matériel, pouvant a priori paraître relativement découplés, s'avèrent très complémentaires.

1.3 Objectifs du projet de recherche

Les principaux objectifs de cette thèse se résument en trois points. Tout d'abord, la compréhension du problème reste l'objectif premier, ce qui implique une connaissance approfondie

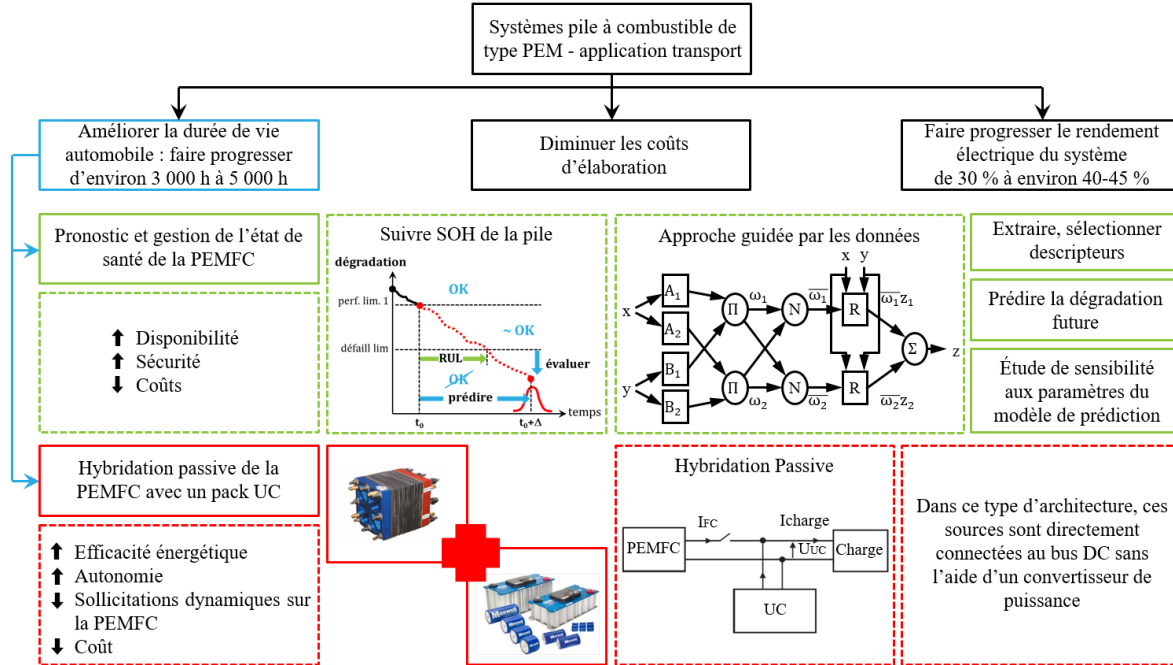


Figure 1.3 – Synthèse de la problématique de recherche

sur les PEM-FCS et leur hybridation, le sujet du PHM en général et son application au cas particulier de ces systèmes.

Le deuxième objectif vise la conception d'un système de pronostic en utilisant un modèle de prédiction permettant d'estimer le RUL du PEM-FCS. Le moment exact où une défaillance se produit étant incertain, les approches développées seront conçues pour quantifier et minimiser l'erreur de pronostic, de sorte qu'une valeur de confiance puisse être associée à chaque estimation du RUL. Cette métrique de confiance dépend de plusieurs paramètres liés aux données utilisées, à la précision des modèles et à la connaissance des conditions opératoires futures. Ces modèles seront basés sur l'utilisation d'une approche capable d'apprendre le comportement du système à partir des données, notamment en utilisant des techniques d'intelligence artificielle, tels que les systèmes d'inférence adaptatif neuro-flous par exemple.

Finalement, nous considérons l'analyse des apports de l'hybridation passive (sans recours à un convertisseur de puissance) d'un PEM-FCS par des UCs. L'intérêt principal consiste à analyser le comportement électrique subi lors de la connexion de ces éléments. L'état lorsque les UCs sont complètement déchargés suscite un intérêt particulier du fait que le courant initial demandé à la pile à combustible peut atteindre des valeurs très élevées. Dans ce cas, une

fois que les UCs sont branchés, ils sont équivalents à un court-circuit, uniquement limité par la résistance interne de la PEMFC et les UCs. À noter que ce cas peut également s'apparenter à celui d'une défaillance sur le convertisseur statique de puissance de sortie de la pile à combustible (défaillance de type interrupteur statique bloqué en mode fermé).

1.4 Méthodologie

La méthodologie adoptée dans ce travail de recherche se résume comme suit :

- Étude bibliographique sur les PEM-FCS et leur hybridation, le sujet du pronostic en général, et son application au cas particulier de ces systèmes ;
- Acquisition des données à partir des essais expérimentaux sur une PEMFC en mode de fonctionnement nominal et dégradé, et un essai de longue durée ;
- Développement de techniques de pré-traitement des données afin d'extraire ou générer des descripteurs permettant d'identifier les mécanismes de dégradation et de quantifier les dégradations advenant au cours du vieillissement de la PEMFC ;
- Développement d'algorithmes de pronostic guidés par les données capables de traiter des données imprécises et incertaines. Ces outils permettront d'estimer le RUL d'une PEMFC ;
- Description via des simulations, du comportement électrique de l'hybridation d'une PEMFC et un ensemble d'UCs sans adjonction d'un convertisseur statique ;
- Description via des simulations, de la gestion naturelle d'énergie entre une PEMFC et un ensemble d'UCs quand une charge est connectée ;
- Vérification de la tenue aux courants de court-circuit de la PEMFC. L'idée est d'identifier les paramètres du système significativement impactés par un tel défaut.

1.5 Organisation de la thèse

Ce mémoire de thèse est constitué de trois chapitres dans le corps principal et deux chapitres en annexe organisés comme suit :

Le **Chapitre 2** porte sur l'état de l'art concernant le contexte général des PEM-FCS. Les mécanismes de dégradation et les modes de défaillances subis par le cœur/système y sont introduits, et l'hybridation des PEMFC est décrite. L'ensemble permet de mettre en évidence que l'électronique de puissance est un des défauts principaux des PEM-FCS, et de proposer l'hybridation passive avec une source énergétique comme une solution à l'augmentation de la durée de vie. De plus, ce chapitre présente un aperçu des principales réalisations dans le domaine du PHM pour les PEM-FCS. Il pose la nécessité de la conception d'une architecture PHM pour ces systèmes, évalue les approches du PHM existantes, identifie les défis et opportunités associés à la durabilité des PEMFC.

Les troisième et quatrième chapitres illustrent ces deux aspects complémentaires de la problématique de recherche qui a pour but la prolongation de la durée de vie des PEM-FCS. Dans notre étude, nous nous intéressons uniquement aux PEMFC basse température (température de fonctionnement nominale de l'ordre de 60 à 80 °C).

Le **Chapitre 3** est consacré à la conception d'un système de pronostic basé sur une approche guidée par les données. La première étape exige l'identification des informations à partir d'un ensemble d'observations recueillies à partir de capteurs. Par la suite, le but de cette partie consiste à développer les techniques de pré-traitement des données afin d'extraire ou de générer les caractéristiques qui permettront d'identifier les mécanismes de dégradation et de quantifier les dégradations advenant au cours du vieillissement de la PEMFC. Ensuite, un modèle de prédiction est conçu pour estimer le RUL du PEM-FCS. Ce chapitre contient également une description mathématique de chaque algorithme proposé. Une comparaison des résultats présentant les points faibles et forts de chacune des méthodes sont décrits.

Le **Chapitre 4** analyse les apports de l'hybridation passive (sans recours à un convertisseur de puissance) d'un PEM-FCS par des UCs, et présente l'intérêt de cette solution pour l'augmentation de la durée de vie du stack. Ce chapitre débute par une analyse bibliographique sur l'hybridation. Il comprend une description des sources énergétiques et de différentes architectures d'hybridation. Le comportement électrique subi lors de la connexion directe des éléments, ainsi que les aspects tels que la stratégie de gestion naturelle de l'énergie pour commander la répartition de puissance dans le système hybride sont étudiés par simulation. Des simulations sont présentées pour analyser la gestion naturelle d'énergie entre ces sources quand une charge

est connectée. Dans un deuxième temps, une étude expérimentale sur les forts courants circulant à travers la PEMFC est présentée. La procédure expérimentale consiste à court-circuiter les électrodes de la PEMFC. Même si ce n'est pas une condition de fonctionnement en mode nominal, ce mode de fonctionnement peut être considéré comme le courant maximal que pourrait voir la pile à combustible en cas de défaut du convertisseur ou en cas de connexion directe sur un ensemble de super-condensateurs déchargés. La dégradation est quantifiée à l'aide de la spectroscopie d'impédance électrochimique.

Finalement, pour compléter le texte, la conclusion et les perspectives de recherche basées sur les résultats obtenus, ainsi que des annexes résumant quelques bases mathématiques nécessaires ont été placées à la fin de ce mémoire. **L'Annexe A** présente le modèle de la PEMFC utilisé au chapitre 4. **L'Annexe B** présente le résumé des publications scientifiques et communications réalisées au cours de cette thèse.

Chapitre 2

Augmentation de la durée de vie des PEM-FCS

Ce chapitre aborde dans un premier temps des généralités sur les systèmes pile à combustible (FCS – Fuel Cell System) de type à “membrane échangeuse de protons” (PEM – Proton Exchange Membrane). L’accent est mis sur les défaillances possibles des PEM-FCS associées à leurs sous-systèmes, en particulier l’influence du convertisseur de puissance sur la production de défaillances : i.e. l’impact des oscillations de courant haute fréquence générées par le convertisseur statique DC/DC connecté en sortie de la pile à combustible (FC – Fuel Cell), sur le vieillissement de celle-ci. Les principes et les intérêts d’une hybridation des PEM-FCS avec d’autres sources d’énergie complémentaires sont proposés comme un moyen d’augmenter leur durée de vie.

Dans un deuxième temps, ce chapitre passe en revue l’état actuel des connaissances au sujet du pronostic et gestion de l’état de santé (PHM – Prognostics & Health Management), ainsi que les différentes approches existantes. Il présente une méthodologie systématique de supervision permettant l’intégration des étapes PHM ayant pour but d’aider à la prise de décisions d’actions prévisionnelles, servant à réduire les risques dans les composants/système et les coûts de maintenance. Des critères d’évaluation du pronostic sont proposés, avant de définir les enjeux et défis du PHM pour ces systèmes.

Les contributions apportées dans ce chapitre sont les suivantes : (i) nous mettons en évi-

dence la problématique de l'électronique de puissance comme étant un des points faibles des PEM-FCS ; (ii) nous proposons l'hybridation passive des PEM-FCS comme une solution alternative permettant d'augmenter leur durée de vie ; (iii) nous posons la nécessité de la conception d'une architecture PHM pour les PEM-FCS et ; (iv) nous évaluons les défis de la recherche en matière de développement des systèmes PHM et les opportunités associées à la durabilité des PEMFC.

2.1 Le PEM-FCS vue comme un système complexe

Dans un système complexe¹, il existe divers modes de fonctionnement ou états fonctionnels, incluant les modes associés aux défaillances. Le fonctionnement d'un système est considéré comme en état de fonctionnement défaillant quand il n'est pas en mesure d'accomplir les fonctions pour lesquels il a été conçu [31, 32]. Les défaillances sont causées par des défauts via leur activation ou leur occurrence et dont la suppression permettra d'éliminer la panne. La notion de défaut est définie comme l'écart entre les valeurs de la caractéristique observée sur le composant ou système et la caractéristique de référence ou valeur théorique attendue. Cette différence est idéalement nulle en cas d'absence de défaut [31]. Une cause de défaut est généralement le résultat d'un dysfonctionnement dans un processus spécifique, d'erreurs commises durant la conception, et/ou des erreurs opérationnelles ou dans la maintenance du système [33]. En outre, chaque mode de défaillance produit un effet qu'il faut identifier à travers des symptômes observés. Les contraintes opérationnelles doivent être prises en compte lors de la conception ou du contrôle du système [34]. On appelle "effet" la manière selon laquelle un mode de défaillance se produit sur le système ou un composant. Le degré de l'effet peut varier sur la performance du système d'un niveau relativement faible jusqu'à une perte majeure de l'équipement [35]. L'apparition d'une défaillance sur le système peut être le résultat d'un processus de dégradation. Une dégradation est un processus d'altération causée par des changements dans les propriétés structurelles inhérentes d'un système, affectant les performances présentes et futures de manière irréversible [31].

Un PEM-FCS comprend un nombre d'auxiliaires nécessaires pour faire fonctionner le stack

1. Un système complexe est un ensemble d'éléments technologiques différents, en interaction entre eux et avec l'environnement de façon simultanée, il a pour but d'accomplir une mission ou de répondre à une finalité.

Les conditions d'usage des véhicules à pile à combustible (FC-HEV – Fuel Cell Hybrid Electrical Vehicles) donnent lieu à une assez grande variété de phénomènes physiques dégradants. Les PEM-FCS sont sujets aux mécanismes de dégradation se produisant sur une longue période ou dans des conditions sévères. Diverses combinaisons de facteurs vont influencer sur la fiabilité de ces systèmes complexes, certains d'entre eux vont jouer un rôle majeur dans l'activation et l'accélération de la dégradation, tandis que d'autres peuvent être ignorés. Le stack est considéré comme étant le cœur du système, il convient de noter que la mise en défaut d'une seule des cellules entraîne la mise hors service du système global. En complément, il est aussi important de mentionner qu'un défaut survenu dans certains composants auxiliaires a des répercussions sur le fonctionnement du stack et donc, les défaillances peuvent être détectées à l'aide du stack. En d'autres termes, le stack lui-même peut être vu comme un capteur.

Le schéma illustre le processus de fonctionnement d'une pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) alimentée en hydrogène. Les composants et flux sont les suivants :

- Entrées :** Combustible (Hydrogène) et Comburant (Air).
- Pré-traitement :** Le combustible passe par un "Conditionnement combustible" et le comburant par un "Conditionnement comburant". Ces deux flux sont gérés par la "Gestion de l'eau".
- Cœur du système :** L'LT-PEMFC Stack, représentée par une image 3D de la pile.
- Contrôle :** Le "Contrôle/Commande Supervision" gère l'ensemble du processus, recevant des données de température (60 à 80 °C) et envoyant des commandes.
- Sorties et Gestion :** La pile génère de l'énergie qui est envoyée à la "Conversion de l'énergie" puis à la "Charge". Les gaz d'échappement sont traités ("Traitement des gaz d'échappement"). La "Gestion thermique récupération de l'énergie" récupère la chaleur pour maintenir la température optimale.

Figure 2.1 – Les sous-systèmes d'une PEMFC à basse température

- **Dysfonctionnement réversible** : après l'occurrence d'un tel dysfonctionnement et en s'assurant de la mise en œuvre d'une action corrective, le stack peut récupérer ses performances initiales. Ces dysfonctionnements sont généralement liés à un problème dans le stack (empoisonnement au CO du catalyseur, assèchement de la membrane et noyage) ou à une erreur de commande (i.e. opérer le système en dehors des limites prescrites). Les méthodes de PHM indiqueraient, de façon continue ou périodique, l'évolution de la performance du système afin tant d'anticiper le risque de défaillance que de corriger ce dysfonctionnement au cours du fonctionnement de la PEMFC ;
- **Dysfonctionnement irréversible ou dégradation** : après l'occurrence d'un tel dysfonctionnement, la pile ne peut pas retrouver ses performances initiales, même si la cause à l'origine du défaut est éliminée. Idéalement, une fois que la dégradation se produit, les méthodes de PHM aideraient à identifier la cause qui est l'origine du défaut dans le composant à remplacer, de sorte que l'état de fonctionnement des cellules, ou les matériaux du stack, ou le design du système pourraient être ajustés lors des essais ultérieurs afin de minimiser une future dégradation. En outre, si l'étendue et la gravité de la dégradation exige une action immédiate, ces méthodes suggéreront des mesures à adopter afin que le système puisse accomplir sa mission en évitant la panne.

En complément, ces dysfonctionnements peuvent être divisés soit en fonction de l'origine (thermique, chimique, électrochimique, ou mécanique), ou soit en fonction de l'élément affecté. La Figure 2.2 présente une synthèse des facteurs opérationnels influençant la fiabilité dans une PEMFC (extrait à partir de [9]). Il convient de noter que même si les dégradations considérées ont des causes différentes et impliquent différents éléments, les conséquences sont toujours une perte de puissance, instabilité et diminution de la durée de vie² dans la pile.

En résumé, les performances du système dépendent à la fois du cœur de pile, des auxiliaires et du contrôle du système : les fonctions à réaliser sont multiples et les contraintes d'intégration et de coût sont importantes. Dans cette optique, les choix technologiques concernant les divers auxiliaires nécessaires doivent être évalués et adaptés afin de placer la pile dans des conditions de fonctionnement favorables. Nous nous intéressons sur une vision système afin

2. La durée de vie caractérise la période pendant laquelle la PEMFC est en mesure de fonctionner, dans des conditions opératoires données (point(s) de fonctionnement, environnement définis), sans qu'une forte dégradation de son rendement ne soit observée.

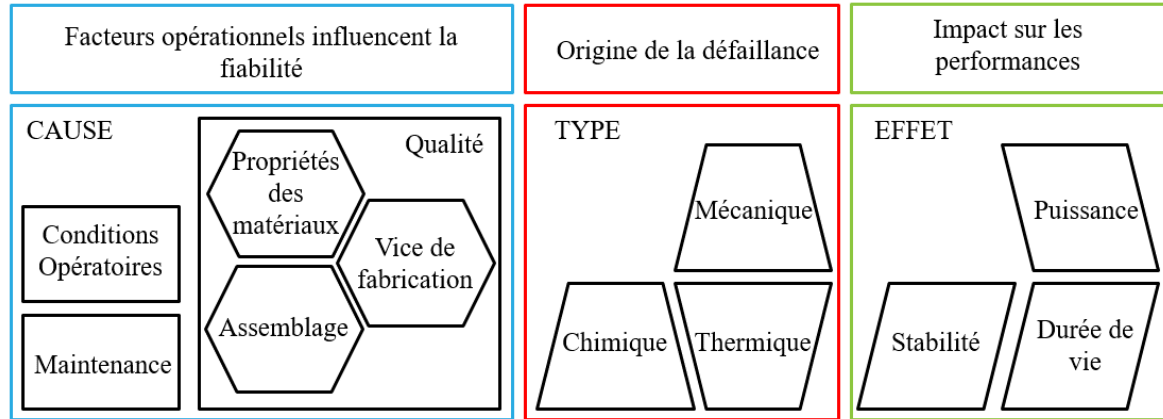


Figure 2.2 – Représentation schématique des modes de défaillance dans une PEMFC [9]

d'établir une compatibilité fonctionnelle et physique de ces auxiliaires et ces lois de gestion vers une intégration optimisée du stack. L'étude de défaillances au niveau système, présenté à continuation, a été le sujet principal du projet DIAPASON phase 2. L'objectif de ces expérimentations a été de déterminer la performance d'une PEMFC soumise à des conditions d'opération normales et dégradées. Les campagnes expérimentales ont été réalisées au sein de la Fédération de recherche FCLAB sur un stack de 40 cellules, fourni par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), partenaire du projet.

2.1.1 Circuit d'alimentation anodique et cathodique

Du côté anode, la pile a besoin d'une alimentation en dihydrogène. Ceci est réalisé grâce à un circuit auxiliaire dont l'objectif est de contrôler le débit et la pression du gaz entrant dans la pile. Le dihydrogène peut provenir directement d'un compartiment de stockage. Parmi les principaux systèmes de stockage existants aujourd'hui, nous pouvons citer : le stockage du gaz sous forme comprimée dans un réservoir à une pression allant de 300 à 700 bars ; le stockage du gaz sous forme liquide, le stockage de l'hydrogène à basse pression dans des réservoirs à hydrures métalliques et le stockage sous forme d'hydrocarbures. Actuellement, la solution plus simple est le stockage sous pression. Du côté cathode, un circuit auxiliaire est utilisé pour l'alimentation en dioxygène de la pile. Comme pour le côté anode, les pressions et débits sont régulés. Ici, le dioxygène peut être fourni pur (cela nécessite la présence d'un réservoir) ou contenu dans l'air. La deuxième solution est la plus souvent choisie pour ses critères pratiques,

et dans ce cas, il est nécessaire d'avoir recours à un compresseur d'air ou à une soufflante.

De manière générale, l'alimentation en gaz doit être la plus uniforme possible sur la surface de l'électrode afin d'assurer l'alimentation de la plus grande partie possible du catalyseur en réactifs et d'éviter ainsi les points chauds dus au caractère exothermique de la réaction électrochimique. De plus, dans le cas des PEMFC basse température, l'état d'hydratation de la membrane étant primordial, un système d'humidification du gaz est nécessaire. L'eau utilisée ici peut venir d'un réservoir ou être récupérée par un système placé en sortie de pile (la réaction à la cathode produisant de l'eau).

Les défauts dans ce sous-système sont considérés de rares à relativement fréquents. Les causes à l'origine de ces dysfonctionnements peuvent être liées à la variation de vitesse du groupe moto-compresseur, des problèmes d'électronique/contrôle sur l'interface de commande, une mauvaise génération de la consigne de débit d'air, un retard sur la génération de cette consigne et/ou sur la valeur réelle du débit, une mauvaise estimation de la vitesse de rotation du moteur d'entraînement du compresseur d'air, entre autres.

Les débits des gaz ont une grande influence sur l'humidité dans la pile. Ils jouent un rôle important dans l'évacuation de l'eau au sein des canaux et des couches de diffusion. Dans des conditions d'eau en excès, la vapeur d'eau dans les cellules peut se condenser et bloquer le transport de gaz dans les électrodes, les couches de diffusion et les canaux de gaz [36]. Des pertes par transport de matière se produisent quand il y a un écart entre les taux des réactifs qui sont fournis et la vitesse à laquelle elles sont consommées. Cette disparité peut être provoquée par un certain nombre de processus.

Certains dysfonctionnements, comme le noyage et la corrosion des catalyseurs, sont dues à une faible stoechiométrie. La distribution des gaz réactifs dans les cellules de la FC n'est pas suffisamment homogène pour chacune des cellules de la pile. Des gouttelettes d'eau liquide risquent d'obstruer les canaux d'écoulement ou les couches de diffusion, ce qui conduit à des variations dans les tensions de cellules.

Certains dysfonctionnements, comme l'amincissement ou perçage de la membrane, sont dues à une sur-stoechiométrie en air ou à des gaz réactifs insuffisamment humidifiés qui peuvent assécher les cœurs de pile et entraîner une augmentation des pertes ohmiques, ce qui limite la migration des protons à l'intérieur de la membrane électrolytique. Un débit d'air élevé résulte

dans une meilleure répartition des gaz réactifs dans les canaux de distribution, ceci induit également une augmentation de la concentration en oxygène dans la couche catalytique qui permet d'améliorer les performances de la FC. Malheureusement, un fort débit et une sur-stœchiométrie élevée impliquent également un coût énergétique d'amené des gaz important, ce qui entraîne une baisse du rendement du système car aucune autre utilisation de ce gaz n'est mise en œuvre. Enfin, il est à noter qu'une variation importante et brutale du débit peut entraîner le déchirement de la membrane électrolytique.

2.1.2 Circuit de refroidissement

Une PEMFC ne produit pas seulement de l'énergie électrique ; elle produit également de la chaleur. Le rôle du circuit de refroidissement consiste à évacuer la chaleur afin de contrôler la température de fonctionnement de la pile. La régulation thermique de la PEMFC est critique puisque la performance du système dépend fortement de sa température, d'où le contrôle de la température se fait à l'aide d'un ventilateur ou via un sous-système de réfrigération de l'eau. Garantir une température homogène au cœur de la pile est essentiel pour avoir une répartition de densité de courant tout au long des plaques bipolaires. Les différents systèmes de refroidissement dépendent de la puissance de la pile et de la compacité souhaitée. Les différentes topologies de refroidissement sont : par convection naturelle avec l'air ambiant (puissance du stack inférieure à 100 W) ; par convection forcée à l'aide de ventilateurs (les plaques bipolaires peuvent comporter des ailettes) ; par circulation d'un fluide caloporteur dans les plaques bipolaires couplé à un échangeur (un auxiliaire de type pompe est donc nécessaire). Pour éviter les dégradations dans les systèmes à puissances élevées, il faut également refroidir certains auxiliaires (pompes, moteurs, convertisseurs). Il est à noter que pour valoriser une partie de la chaleur perdue, des systèmes de cogénération sont développés [37].

Les défauts dans ce sous-système sont considérés de rares à relativement fréquents. Les causes à l'origine de ces dysfonctionnements sont par exemple un ralentissement de la pompe du circuit de refroidissement, un problème au niveau de l'échangeur primaire, un problème au niveau de l'échangeur secondaire, ou un problème de contrôle/commande.

Une diminution du débit de l'eau de refroidissement peut conduire à une répartition non uniforme de flux à travers les canaux de refroidissement, ce qui provoque une surchauffe locale.

L'augmentation de la température du stack pendant une durée réduite peut créer des points chauds. Par ailleurs, la génération excessive de chaleur peut provoquer le déchirement de la membrane, et voire même provoquer son inflammation [37]. A haute température, les matériaux de la membrane dans la couche catalytique peuvent ne pas être totalement hydratés. La conductivité de la membrane et la surface active du catalyseur diminuent en raison de la réduction de l'humidité relative des gaz de réaction et de la réduction de la teneur en eau de la membrane. Lorsque la température augmente, il y aura un plus grand taux d'évaporation de l'eau. Lorsque la température atteint une valeur critique pour laquelle la quantité d'eau évaporée est supérieure à la quantité d'eau produite, la membrane va commencer à s'assécher.

2.1.3 Circuit électrique

L'énergie électrique produite par la pile est conditionnée au travers d'un circuit électrique relié à la charge. La PEMFC est vue par la charge comme un générateur de tension/courant contrôlé. La tension étant continue est dépendante du courant demandé, mais aussi de la température, des pressions partielles des gaz réactifs, de l'hygrométrie, des stoechiométries et de l'état de vieillissement de la pile. Une PEMFC peut subir de fortes contraintes lors d'une utilisation dans des applications automobiles : si elle n'est pas hybridée, elle fonctionne toujours à un état de charge fortement variable, la puissance demandée suit celle requise au niveau de la chaîne de traction³. Si une hybridation existe, la demande de puissance au niveau de la pile à combustible ne sera pas directement corrélée à celle de la chaîne de traction, mais n'en demeurera pas moins variable. De manière globale, la chute de tension de chaque cellule individuelle est fortement influencée par les conditions de charge (i.e. la tension atteint une valeur maximum lorsqu'aucune charge n'est appliquée, tandis qu'elle diminue au fur et mesure d'une augmentation du niveau de courant requis). Les variations rapides de la puissance ont un effet important sur la durée de vie des PEMFC. Ces variations peuvent donner lieu à des phénomènes d'appauvrissement des gaz réactifs et à une gestion de l'eau inadéquate, en raison d'une réponse lente des cellules aux variations de charge [38]. La PEMFC fonctionnant en faible courant peut entraîner une corrosion de la couche catalytique et conduire à la réduction de la

3. La chaîne de traction d'un véhicule électrique est définie par l'ensemble des éléments depuis la source d'énergie jusqu'à la transmission mécanique, qui assurent la fourniture d'une puissance électromécanique capable de mouvoir le véhicule.

tension des cellules individuelles du stack [38]. De ce fait, dans de nombreux cas, la présence d'une interface d'électronique de puissance peut être nécessaire pour garantir une tension stable sur le bus continu de sortie et selon les besoins de la charge. Suivant l'architecture du système et la stratégie opératoire retenue, le bus continu est relié à des éléments de stockage d'énergie électrique (batteries, super-condensateurs (UC – Ultra Capacitor), ...) et à d'autres convertisseurs (DC/DC et DC/AC).

Dans les applications transport utilisant un PEM-FCS, la plupart des recherches proposent des topologies de bus de tension continue (DC). Un convertisseur DC/DC a alors pour rôle d'adapter les grandeurs électriques de la PEMFC aux demandes variables du consommateur d'énergie. La motivation d'utiliser un convertisseur de puissance est de permettre à la PEMFC de travailler à assez haute efficacité en minimisant les pertes internes. Cependant, la présence de convertisseurs statiques augmente les sources de défaillances et pannes (défaillance des interrupteurs du convertisseur statique lui-même, impact des oscillations de courant haute fréquence sur le vieillissement de la pile), et augmente également les pertes énergétiques du système complet (même si le rendement du convertisseur statique est élevé, il dégrade néanmoins le bilan global) [39–41].

Un convertisseur statique en électronique de puissance est généralement composé à partir des principaux éléments suivants : semi-conducteurs de puissance, composants passifs de puissance (tels que filtres, transformateurs), interconnexions, circuits de contrôle et auxiliaires. Chacun de ces éléments contribue à la densité de puissance finale du convertisseur et chacun d'entre eux doit être considéré afin d'atteindre les exigences attendues : la plus haute densité de puissance possible, un rapport élevé de tension et une faible ondulation de courant [30]. Afin de rendre plus efficaces les convertisseurs associés aux PEM-FCS, de plus amples travaux sur la modélisation, en ce qui concerne le choix et l'agencement des composants actifs, seront nécessaires pour faire face aux contraintes industrielles, comme : simplicité de mise en œuvre et coût (faible masse et petit volume), haute efficacité énergétique, faible perturbation électromagnétique et ondulation de courant réduite. De plus, les convertisseurs DC/DC destinés aux applications automobiles doivent être conçus pour fonctionner efficacement à des températures élevées.

Les pertes les plus critiques dans les convertisseurs DC/DC sont les pertes de conduc-

tion dans les interrupteurs de puissance, les pertes joule et les pertes magnétiques dans les inductances. Les défaillances dans ce composant peuvent être attribuées à différents facteurs, tels que : défaillance de la commande, des conditions de fonctionnement transitoires ou permanentes inappropriées. Plusieurs travaux ont été rapportés dans la littérature concernant l'étude de défauts dans les convertisseurs DC/DC [40, 42–46]. Ils concluent que les condensateurs électrolytiques et les dispositifs semi-conducteurs se dégradent plus rapidement que les autres composants, la dégradation dans ces composants exerce une influence considérable sur l'efficacité opérationnelle des convertisseurs DC/DC : elle provoque une diminution de la tension en sortie du convertisseur vers une valeur en dessous des spécifications, et peut éventuellement conduire à une panne ou à une défaillance sur le système entier.

La performance du condensateur électrolytique est fortement affectée par les conditions de fonctionnement défavorables comme les surtensions, les variations brusques de courant, la fréquence et la température élevées. Selon les auteurs cités ci-dessus, les indicateurs permettant d'évaluer l'état de santé (SOH – State Of Health) dans un condensateur électrolytique sont la résistance équivalente série, la capacité, le facteur de dissipation ou le courant de fuite. Le dysfonctionnement réversible plus courante est due à une surtension, il est traduit par une augmentation de la résistance équivalente série et une diminution de la capacité. Les dysfonctionnements irréversibles pour un condensateur électrolytique sont caractérisés soit par un court-circuit, soit par un circuit ouvert. Le flux de courant pendant les cycles de charge/décharge cause une élévation de la température interne du condensateur que, en excès, peut provoquer un vieillissement progressif du condensateur, voir même l'évaporation de l'électrolyte. En outre, un lien direct peut être établi entre l'augmentation de la température interne du condensateur et un taux accru de réactions chimiques, cela génère une augmentation de la pression interne créant un rapprochement local des électrodes ou la cassure du couvercle du boîtier du condensateur.

La technologie des semi-conducteurs de puissance utilisée pour s'adapter aux caractéristiques électriques de la PEMFC est du type basse/moyenne tension commutant des forts courants. Le MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) est généralement préféré en haute fréquence, basse/moyenne puissance, tandis que l'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) est préféré pour les applications à basse fréquence et forte puissance. Les

transistors MOSFET ou IGBT avec des fréquences de commutation relativement élevées permettent de maîtriser l'ondulation du courant, de réduire la taille des composants passifs et favoriser une intégration système, en particulier pour des applications automobiles. Cependant, ces dispositifs subissent de fortes contraintes thermiques et électriques, la commutation à haute vitesse provoque des effets indésirables tels que : l'émission de perturbations radio fréquence. En outre, les convertisseurs électroniques de puissance sont considérés comme une source importante d'interférence électromagnétique en raison des variations très rapides des tensions et courants au sein des composants en commutation. De la même façon, l'ondulation de courant a des effets adverses sur les composants du convertisseur. Selon [47], en présence d'un défaut, les inductances de phase subissent un stress additionnel, dû à l'ondulation de courant qui dépasse le seuil maximum spécifié par l'inductance, cette augmentation peut conduire à l'élévation interne de la température et à la saturation du circuit magnétique. En dépassant l'induction de saturation, la valeur de l'inductance chute, ce qui peut avoir des impacts sur le contrôle du convertisseur.

La mise en œuvre des stratégies tolérantes aux défauts est axée principalement dans le design des convertisseurs multi-niveaux avec plusieurs composants et dans l'intégration des méthodes de redondance naturelle par des combinaisons d'états de commutation [48]. Afin de prévenir les défauts, en particulier pour une architecture redondante, les éléments du convertisseur (inductances, interrupteurs de puissance, diodes, condensateurs) devraient être surdimensionnés par rapport au cahier des charges initiale, ou encore plusieurs composants seront ajoutés. En conséquence, la mise en place de ces composants impose un coût supplémentaire qui au même temps est lié à un ajout de masse et d'encombrement du convertisseur sans assurer nécessairement une plus grande efficacité [47, 48].

En résumé, la génération suivante des convertisseurs de puissance doit non seulement satisfaire aux caractéristiques demandées par la charge et respecter les contraintes électriques de la pile à combustible, mais doit aussi considérer ses propres contraintes multi-physiques. Si bien le choix technologique et l'association des composants de puissance accordée dans la phase de conception (architecture du système, topologie du circuit) est considéré comme un point clé pour assurer de bonnes performances énergétiques ; la fiabilité d'un convertisseur de puissance dépend en large mesure de l'habileté du système à traiter un dysfonctionnement. Dans ce

sens, l'intégration des méthodes efficaces pour la surveillance du SOH ou la détection d'un défaut, est en outre, un aspect important à aborder pour atténuer les risques de défaillance et réduire le coût du cycle de vie des convertisseurs de puissance et systèmes électroniques.

2.1.4 Circuit de commande

Ce sous-système met en œuvre une stratégie pour contrôler l'ensemble de paramètres de fonctionnement du système, il est généralement composé de capteurs, contrôleurs, entre autres. L'objectif du contrôle, au sens global du terme, est d'assurer le flux d'énergie de la pile par le débit des gaz, de gérer les phases de démarrage et d'arrêt du dispositif, et d'agir sur les actionneurs pour répondre aux sollicitations électriques demandées en assurant le fonctionnement optimal du PEM-FCS. L'asservissement de la pile et de son système est délicat, la nature et la complexité varient en fonction de ses objectifs : contrôle de la puissance produite, de la température, du rendement maximum ou d'une durée de vie maximale.

Un facteur important à prendre en compte dans la dynamique du contrôle est la diversité des constantes de temps différentes qui s'appliquent à la PEMFC. Le temps de réponse de la pile est limité par les contraintes sur le débit des gaz, la pression anodique et cathodique, la température et la gestion de l'eau. Le superviseur doit s'assurer en permanence que les conditions opératoires de ces paramètres soient optimales. Le contrôle de la commande du système doit être fiable et robuste et doit s'adapter à l'état de dégradation naturelle ou subite du cœur de la pile. C'est pourquoi des méthodes, si possible non intrusives, de pronostic et d'évaluation du SOH du cœur de pile à combustible doivent être intégrées pour permettre l'évolution du contrôle-commande en fonction du SOH détecté.

En guise de conclusion à cette section, il convient de noter que l'intégration des PEM-FCS dans les applications automobiles implique l'optimisation globale du système. Pour être compétitif, en termes de performances et d'autonomie, avec les véhicules conventionnels équipés avec des moteurs à combustion interne, les PEM-FCS doivent être adaptés aux exigences de puissance du véhicule dans toutes les conditions de conduite représentatives d'un fonctionnement réel. La solution proposée dans la section suivante consiste à ajouter une source d'énergie embarquée dans le but de garantir des niveaux de tension suffisants sur les tensions cellules et minimiser l'impact de conditions dégradantes, et d'autre part pour assurer le fonctionnement

efficace du véhicule sur le profil de charge électrique demandé.

2.2 Hybridation entre une PEMFC et des UCs

L'hybridation au sens énergétique se définit comme l'association d'une ou plusieurs sources d'énergie présentant des propriétés complémentaires en termes d'énergie, de puissance et de dynamiques associées [26]. Dans le cas des applications automobiles, la demande de puissance de la charge est soumise à des variations selon le profil de vitesse imposé par le conducteur. En conséquence, le comportement global du système hybride dépend à la fois de l'association des différents constituants, de la commande du système de traction et de la stratégie de gestion d'énergie mise en œuvre. La commande du véhicule est faite à partir d'une loi de contrôle de la charge selon la puissance demandée à partir de la pédale d'accélérateur ou de la pédale de frein et d'autres signaux de commande. Tandis que la stratégie de gestion d'énergie consiste à trouver une distribution de puissance entre les sources du véhicule en respectant un cahier des charges préalablement défini : i.e. assurer le fonctionnement de la source principale d'énergie dans sa région de fonctionnement optimal, maintenir le niveau des sources d'énergie auxiliaires dans une zone imposée permettant d'éviter un rechargement de celles-ci à partir d'une source extérieure au véhicule, optimisation de la consommation énergétique du système complet, entre autres.

Par simplicité, un FC-HEV se compose habituellement de deux sources d'énergie : la PEMFC est utilisée comme source d'énergie principale et une source supplémentaire capable d'apporter les pics de puissance exigés par la charge, de récupérer l'énergie de freinage et de pallier les défaillances réversibles dans le PEM-FCS. Parmi les avantages potentiels de la hybridation nous pouvons citer : la réduction de la consommation d'hydrogène, la possibilité d'améliorer la dynamique du PEM-FCS, la réduction du coût et du poids du système global, la réduction du temps de préchauffage du système pour atteindre la pleine puissance. Néanmoins le principal inconvénient est une plus grande complexité dans la conception et le contrôle du système [49].

Le rapport accélération/autonomie joue un rôle important en ce qui concerne les applications automobiles. À titre d'illustration, nous présentons le diagramme de Ragone (Figure

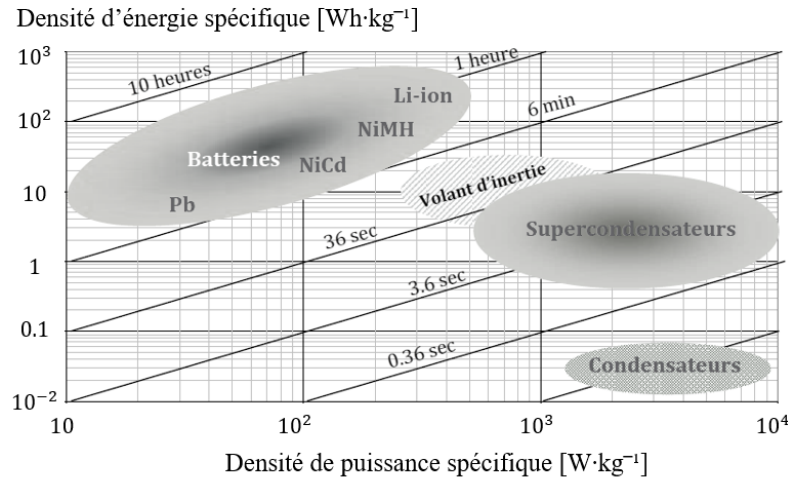


Figure 2.3 – Diagramme de Ragone pour différents sources de stockage d'énergie [10]

2.3) pour comparer les performances des différents éléments de stockage d'énergie utilisés dans des applications de propulsion. Ce diagramme représente la densité massique de puissance en fonction de la densité massique d'énergie, les lignes transversales indiquent le temps nécessaire à la charge ou la décharge des systèmes de stockage. Par exemple, les condensateurs électrochimiques bénéficient d'une densité de puissance spécifique importante mais une faible densité d'énergie spécifique, leur utilisation s'exprime généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de millisecondes. En comparaison, les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie élevée pouvant être utilisée avec une constante de temps supérieure à quelques minutes. Les UCs quant à eux, ont une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes, une forte densité de puissance mais une énergie assez faible.

Dans le cadre de ce travail, nous soulignons que l'hybridation PEMFC avec un seul élément de stockage d'énergie électrique comme les UCs semble une association pertinente au regard de leur complémentarité en termes de puissance spécifique et d'énergie spécifique. Nous présentons la PEMFC comme source principale d'énergie et nous proposons d'adjoindre à ce générateur des UCs comme source secondaire donnant ainsi un système hybride capable de satisfaire les critères issus du cahier des charges sans compromettre les performances du véhicule en matière du poids, de volume, d'autonomie, de rapidité de charge, de durée de vie et de puissance instantanée de stockage ou de déstockage.

La Figure 2.4 présente la notion de chaîne de traction hybride et les différentes manières

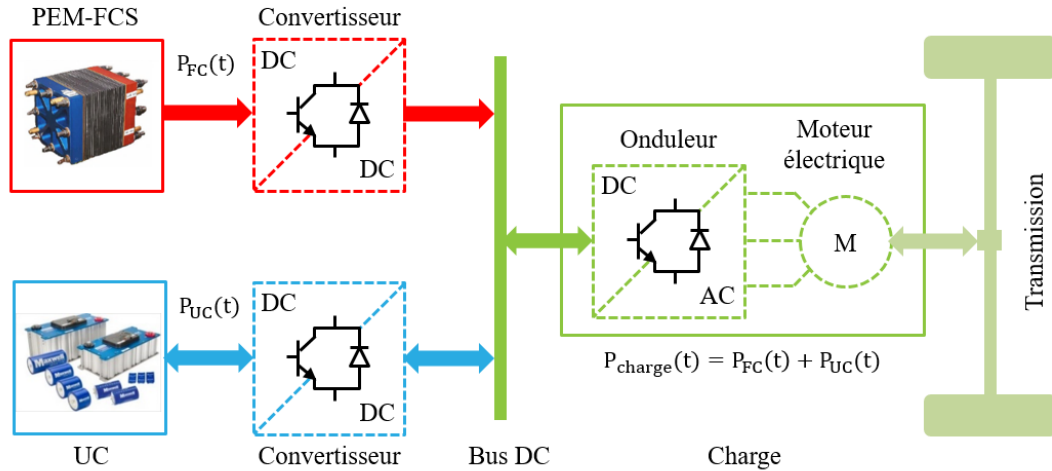


Figure 2.4 – Schéma conceptuel de la chaîne de traction d'un FC-HEV

de combiner les flux d'énergie et de puissance pour répondre aux exigences de la charge. La puissance de charge dans le système hybride est formée de deux composantes : une composante fournie par la pile et une autre par les UCs. En effet, la PEMFC délivre la puissance moyenne nécessaire à la traction électrique (l'autonomie du véhicule), tandis que le démarrage, l'accélération et le freinage par récupération, qui mettent en jeu des échanges de puissance instantanés importants, sont assurés avec une efficacité élevée par les UCs, réduisant ainsi au minimum les contraintes sur la source d'énergie principale. Les UCs peuvent également restaurer leur énergie à partir de la pile, lorsque la puissance de charge est inférieure à la puissance nominale du PEM-FCS. Parmi les principaux rôles du système de stockage d'énergie choisi, nous pouvons citer [49] :

- Fournir la puissance de traction au démarrage du PEM-FCS : en effet, en particulier dans des conditions de démarrage à froid, la puissance du PEM-FCS est inférieure à sa puissance nominale. En conséquence, le rôle des UCs est de compenser la puissance jusqu'à ce que la pile atteigne sa puissance nominale ;
- Fournir la puissance requise au cours de cycles de conduite : l'énergie stockée dans les UCs peut fournir les demandes transitoires d'énergie. Lors d'un pic de puissance qui suit la consigne du conducteur, i.e. dans une forte accélération, il est possible de fournir tout ou une fraction de la puissance de propulsion à la charge et compenser la dynamique lente de la PEMFC. Les exigences maximales de puissance dans un FC-HEV ont généralement

lieu lors des accélérations maximales, tandis que les besoins en énergie plus élevés ont lieu lors de la conduite en pente ascendante ;

- Récupérer l'énergie de freinage : lorsque la puissance de charge est négative, i.e. lors des freinages du véhicule, il est possible de récupérer cette énergie (pour peu que les convertisseurs soient réversibles en courant) et recharger la source auxiliaire : la charge convertit une partie de l'énergie de freinage en énergie électrique qui peut ensuite être stockée dans les UCs. Cela permet d'améliorer l'efficacité du véhicule par la récupération de l'énergie qui est normalement dissipée au niveau des freins pendant le freinage, cette quantité d'énergie dépend du cycle de conduite considéré et varie de 5 % dans un cycle routier à près de 18 % dans un cycle urbain ;
- Fournir l'énergie nécessaire à l'alimentation des auxiliaires électriques dans le véhicule : un FC-HEV dispose de plusieurs auxiliaires électriques (direction assistée, système de conditionnement d'air, ...). Ces charges varient au cours du cycle de conduite, il peut néanmoins être envisagé que les UCs fournissent la puissance nécessaire à l'alimentation de ces dispositifs pendant certaines périodes au cours du cycle de conduite, i.e. si la PEMFC est arrêtée.

Très peu d'études portant spécifiquement sur les interactions entre les PEM-FCS et les convertisseurs ont été effectués. Dans [47, 50–52], les auteurs discutent l'impact de l'ondulation de courant provenant de convertisseurs de puissance sur les performances de la pile. Ils concluent que les convertisseurs de par leur conception, imposent des courants à différents amplitudes et fréquences. Dans le cas d'un FC-HEV, la plage de fonctionnement du convertisseur doit couvrir une ondulation du courant comprise entre 10 à 15 % du courant nominal ; et une fréquence du courant pulsé située entre 5 à 20 kHz. Par exemple, l'association d'une PEMFC à une topologie de convertisseur continu-continu (DC/DC), comme le buck et le boost, impose des ondulations de courant à hautes fréquences. Le convertisseur continu-alternatif (DC/AC) impose, quant à lui, en plus des ondulations hautes fréquences, des ondulations à basses fréquences. Une ondulation à haute fréquence peut entraîner une réduction de la durée de vie, notamment une diminution à long terme de la surface active de platine dans les catalyseurs de la PEMFC ; pertes additionnelles internes limitant la capacité de puissance en sortie ; et une

surconsommation d'hydrogène. En revanche, les harmoniques de courant à basse fréquence introduisent problèmes d'instabilité dans la PEMFC.

Utiliser une hybridation passive est ici évoquée comme possible solution quant à la façon de lisser les contraintes imposées par les dynamiques dans la PEMFC. Elle est moins complexe et les pertes globales sont plus basses. La principale caractéristique de cette configuration est que la PEMFC et les UCs sont connectés directement à la charge. Cette configuration permet une prise en compte des contraintes de chaque source et établit une autogestion basée sur la puissance moyenne de la PEMFC et l'état de charge des UCs. Le partage d'énergie et la puissance fournie peuvent être contrôlés en ajustant les paramètres d'entrée de chacun des deux éléments. Toutefois, la pile nécessite un organe auxiliaire de démarrage.

Au-delà de la prise en compte des caractéristiques des différents composants du système, des phénomènes d'interaction entre la PEMFC et la chaîne de traction hybride, il est pertinent d'indiquer que les PEM-FCS doivent assurer une continuité de service, ainsi que faire preuve d'une capacité à fonctionner en cas d'apparition d'un défaut. Comme nous le verrons par la suite, l'intégration des techniques PHM conduit à une augmentation de la durée de vie du système global, cela permet une meilleure disponibilité et une réduction conséquente des coûts opératoires et de maintenance. Plus précisément, l'estimation de la durée de vie lors du fonctionnement normal du véhicule est un point clef de leur développement, conduisant tant à des rendements élevés au niveau du système qu'à une efficacité de fonctionnement accrue.

2.3 Pronostic et gestion de l'état de santé des PEM-FCS

Dans cette section, nous soulignons le défi majeur que pose la migration d'une maintenance réactive vers une maintenance proactive de type prévisionnelle dans un effort pour réduire les coûts globaux de maintenance et le temps où le système n'est pas opérationnel. Le processus de maintenance des systèmes complexes est une tâche importante qui nécessite un savoir-faire approprié pour les fabricants et les opérateurs. En effet, la maintenance est définie comme l'ensemble d'actions techniques et de gestion destinées à maintenir ou à rétablir un système dans un état qui assure l'exécution des fonctions requises. Les pratiques de maintenance traditionnellement utilisées ont été classées en deux catégories : réactive et proactive.

La maintenance réactive implique le fonctionnement du système jusqu'à ce qu'une panne se produise pour entreprendre des actions correctrices. Généralement, ce type de maintenance est non programmé : après une détection de panne, l'élément endommagé est remplacé ou rétabli vers un état de fonctionnement adéquat. Au contraire, la maintenance proactive est considérée soit préventive ou prévisionnelle. La maintenance préventive repose sur l'évaluation de la condition physique du système, elle peut être évaluée par l'observation d'un opérateur, réalisée selon un échancier, ou par la surveillance d'état des paramètres du système. Ce type de maintenance est effectué afin de maintenir le système en bonne santé et ainsi éviter les pannes dans le service. La maintenance préventive est "statique", par opposition à la maintenance prévisionnelle, qui est aussi "préventive", mais "dynamique".

La maintenance réactive, ainsi que la maintenance proactive de type préventive est coûteuse à réaliser et la durée de vie utile du système et ses composants n'est pas maximisée ; surtout dans le cas des PEMFC où la qualité de fabrication du stack n'est pas uniforme. En effet, quelle que soit l'approche adoptée, les pannes inattendues entraînent souvent l'arrêt du système ; dès lors la maintenance doit être toujours prévisionnelle : les défaillances dans le système peuvent être anticipées et corrigées avant qu'elles ne causent d'importants dégâts, et lorsqu'un composant/sous-système tombe soudainement en panne des actions de maîtrise peuvent être rapidement disponibles pour remettre le système en état de fonctionnement. La prise en compte de la dynamique d'évolution des caractéristiques du système principal et son environnement sont la base de la maintenance prévisionnelle.

Il convient de noter que les principales raisons qui conduisent à la maintenance prévisionnelle du PEM-FCS sont de détecter, localiser et diagnostiquer toutes les anomalies de fonctionnement et de les identifier bien avant qu'un défaut majeur ne se produise. De nombreux travaux de recherche ont été consacrés aux applications capables de diagnostiquer les défaillances dans les PEM-FCS. La méthodologie est fondée sur la quantification d'un indicateur de défaillance, prélevé à un instant donné sur le système, et son évaluation par rapport à ceux du mode de fonctionnement nominal. Les déviations significatives déclencheront l'étape ultérieure de diagnostic (localisation et identification). En revanche, le pronostic permet d'utiliser les indicateurs reflétant l'état de santé du système suffisamment à l'avance, de sorte qu'il reste du temps pour prendre la bonne décision.

En d’autres termes, le diagnostic implique l’analyse des événements qui ont précédé le dysfonctionnement (i.e. identification de la survenance d’un événement qui s’est déjà produit), tandis que le pronostic concerne l’analyse des événements avant la survenance du dysfonctionnement (i.e. prédire le comportement futur du système en observation). Ainsi, en combinant le diagnostic de l’état actuel avec la connaissance a priori du système, il est possible de diagnostiquer des défaillances réversibles ou des événements inattendus, mais également de pronostiquer suffisamment à l’avance, la détérioration de leurs composants ou de leurs sous-systèmes en fonction des phénomènes de vieillissement ou des dégradations irréversibles. La Figure 2.5 présente les processus de détection, diagnostic et pronostic vus comme des activités complémentaires.

La maintenance proactive de type prévisionnelle repose sur trois grandes fonctions “observer”, “analyser” et “agir”. La première fonction s’appuie sur les données acquises par les capteurs du système à surveiller. La deuxième fonction concerne l’analyse des informations acquises. Finalement, la troisième fonction consiste à décider des actions à entreprendre au travers d’actionneurs qui permettent d’agir sur le système. Ainsi, cette architecture doit être capable de prendre en compte la prévision des événements indésirables, amenant le système dans un état incohérent vis-à-vis d’un comportement de référence avant l’apparition de la défaillance, et permettant d’aider à la prise de décisions de maintenance. Ceci est en contraste avec les approches de maintenance traditionnelles dans lesquelles une défaillance se produit

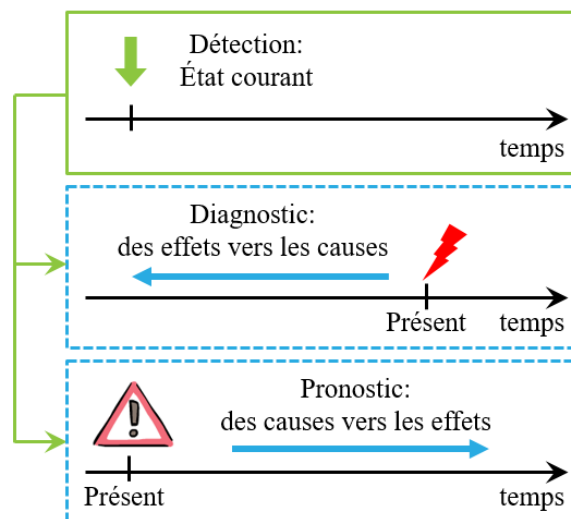


Figure 2.5 – Détection, diagnostic et pronostic : les aspects phénoménologiques

généralement sans préavis, entraînant des retards dans l'organisation et la planification des actions correctrices pour remettre le système en service.

Le PHM est une discipline émergente qui a comme objectif garantir sur le long terme une exploitation sûre du système, tout en renforçant la disponibilité, et en réduisant les coûts liés à l'exploitation et l'entretien du système complexe. Les objectifs, derrière la mise en œuvre d'une architecture PHM, comprennent : (i) une meilleure disponibilité et une réduction conséquente des coûts opératoires et de maintenance grâce à une politique de maintenance et de logistique basées sur un suivi de l'état des composants/système en temps réel ; (ii) une détection plus rapide des dégradations ou des pertes de performance pour une efficacité de fonctionnement accrue ; (iii) une amélioration de la fiabilité et la sécurité des missions critiques.

Le PHM est très diversifié et s'applique principalement aux domaines suivants : l'industrie aérospatiale et l'aéronautique [53, 54], les systèmes électroniques [55–58], les systèmes énergétiques [59–61], la dégradation des matériaux [62–64] ou encore les sciences de la santé [65, 66]. Le PHM des FCS est un domaine où l'exploration est relativement nouvelle et des outils doivent être conçus et mis en œuvre dans une FC afin d'anticiper et éviter les défaillances, d'estimer à moyen et/ou long terme le SOH du système et ainsi décider des plans d'actions et méthodes de contrôle à adopter.

L'ensemble des étapes du PHM vise à détecter, diagnostiquer et prédire les mécanismes de dégradation d'un système. Le processus du PHM des PEMFC est réalisé grâce aux modules décrits ci-après : connaissance des mécanismes de dégradation et modes de défaillance, acquisition de données, pré-traitement des données, diagnostic et pronostic, et aide à la décision. Cette architecture modulaire est illustrée sur la Figure 2.6. Il est à noter que chacune des étapes dans le processus du PHM est liée à l'application visée, la nature des données manipulées, les outils et techniques utilisables [33].

2.3.1 Connaissance a priori des défaillances et mécanismes de dégradation

La première étape dans la construction d'une architecture PHM consiste à identifier les modes de défaillance et les mécanismes de dégradation qui peuvent avoir lieu dans les PEM-FCS. Le développement d'outils du PHM dépend dans une large mesure de la compréhension des phénomènes de dégradation. Pour diagnostiquer ou prédire les défaillances du système

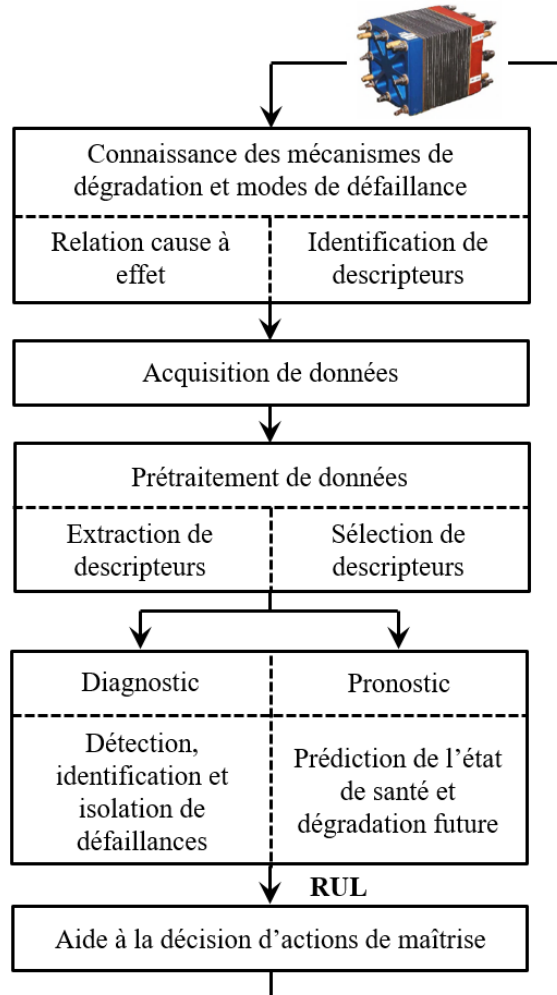


Figure 2.6 – Architecture du processus du PHM pour un PEM-FCS

surveillé, il faut identifier les symptômes et les variables sensibles à ces symptômes. Il s'agit ensuite de déterminer ces variables à partir de la connaissance établie soit par l'expérience passée, par des mesures disponibles, ou par des tests de qualification. Dans de très nombreux cas, ces variables sont également sensibles à des phénomènes annexes, en particulier aux conditions opératoires. Il convient donc de tenir compte pour l'interprétation de ces variables, de leurs relations à la conception du système et de l'historique de l'état de fonctionnement [67, 68].

À ce jour, plusieurs efforts de recherche portent sur la compréhension des processus de dégradation des FCS et ainsi sur l'amélioration de leur durabilité et leur fiabilité. Wu et al., [23] ont présenté une étude détaillée sur les aspects fondamentaux de la durabilité, les mécanismes de dégradation, les stratégies et les plans d'actions à adopter pour les PEM-FCS

basse température. Borup et al., [69] ont fourni une revue détaillée de la durabilité des PEMFC, ils ont étudié les cibles, les méthodes d'essai, et les effets que les conditions d'exploitation ont sur les différents composants, afin de déterminer la durée de vie de ces systèmes. D'autre part, les sources et la nature des contaminants, leur impact sur la performance et la durée de vie des FC, et la compréhension de ces mécanismes de contamination ont été analysés dans [70, 71]. Dans [72], les auteurs présentent une étude sur la dégradation de la tension des PEMFC associés à la gestion de l'eau, ils passent en revue les facteurs qui ont un impact sur la durabilité et présentent certaines stratégies de caractérisation pour prévenir leur survenance. La relation entre les causes et les symptômes liés à la gestion de l'eau (noyage et assèchement de la membrane) sont construits sous la forme d'un arbre de défaillances. Yousfi-Steiner et al., [73] fournissent un aperçu des mécanismes de dégradation associés à la dégradation du catalyseur et du support carboné. Dans cet article, les auteurs se concentrent sur l'appauvrissement de gaz réactifs comme cause principale impliquant les dégradations notées précédemment. Des méthodes de caractérisation et des stratégies de mitigation sont également discutées. Yu et al., [74] présentent une étude bibliographique détaillée de la durabilité des PEMFC, en considérant les conditions de démarrage et arrêt du système. Dans leur travail, ils résument les essais de durabilité, les mécanismes de dégradation et l'adoption des mesures protectrices et méthodes de contrôle. Des travaux récents conduits par Pei et al., [38] passent en revue les principaux facteurs qui influent sur la durée de vie des PEM-FCS vis-à-vis des applications transport.

2.3.2 Module d'acquisition des données

Ce module est destiné à collecter et à stocker des informations pertinentes émanant du système physique en cours de fonctionnement et d'analyse. Ces informations sont recueillies en temps réel et de façon continue, à l'aide de capteurs, et préférentiellement d'une manière non-intrusive. Dans le cas des PEMFC, les mesures recueillies correspondent à des quantités physiques telles que : la température de l'eau de refroidissement, les températures d'entrée et de sortie H₂/Air (thermique), la tension des cellules, le courant et la tension du stack (électrique), la pression d'entrée et sortie de l'air et de l'hydrogène, les vibrations (mécanique), et le niveau d'humidité des gaz (chimique).

Le PEM-FCS peut être caractérisé dans deux modes de fonctionnement différents : nominal et dégradé. Les essais en mode “nominal” sont considérés comme étant les essais de référence pour les méthodes de diagnostic et pronostic investiguées, et les essais en mode de fonctionnement “dégradé” sont utilisés pour alimenter les algorithmes de diagnostic et pronostic proposés. Souvent, les systèmes sont testés dans des conditions de travail plus sévères afin d’accélérer le processus de dégradation et de vieillissement du système. La méthode de caractérisation considérée doit répondre à un double objectif : reposer sur des mesures externes (pour rendre l’approche transposable dans le domaine industriel – en particulier dans le domaine automobile), en nombre aussi limité que possible et générer une base expérimentale servant à alimenter des méthodes PHM.

Les processus physiques et électrochimiques qui se produisent au sein d’une PEMFC sont généralement mesurés en utilisant des techniques de surveillance in-situ et/ou ex-situ. Dans ce travail, l’accent est mis sur le développement de techniques de mesure in-situ, du fait que celles-ci sont bien adaptées aux FCS, car elles n’impliquent qu’un minimum d’intrusion dans le système surveillé. Parmi ces techniques, il convient de mentionner : les courbes de polarisation, la spectroscopie d’impédance électrochimique, les interruptions de courant, des estimations externes de la cartographie de la densité de courant.

Les essais accélérés sont des procédures généralement effectuées au travers de la variation d’un (ou plusieurs) paramètres caractéristiques du système, en leur accordant une valeur en dehors des conditions normales d’utilisation. L’objectif de ces essais est de déterminer les conditions opératoires qui peuvent avoir des effets significatifs par le biais d’une accélération du processus de dégradation et de vieillissement du système. Parmi ces essais accélérés, nous pouvons noter : les variations de température et d’humidité relative à des valeurs indésirables, fonctionnement électrique en circuit ouvert, variations de charge dynamique, exposition aux contaminants, cycles de gel et de dégel, cycles de marche et arrêt, démarrage à froid, appauvrissement des gaz réactifs, ...

Dans [75], les auteurs ont appliqué plusieurs techniques de diagnostic in-situ, pour évaluer la dégradation de l’assemblage membrane-électrodes, en utilisant un stack de quatre cellules d’une PEMFC, constituée de membranes Nafion® d’épaisseurs différentes, et dans des conditions de test accélérés pendant 1 000 heures. En utilisant la mesure de la tension de circuit

ouvert, la performance des cellules individuelles est analysée avant, pendant et après le processus de dégradation. Les résultats montrent que les membranes minces se dégradent beaucoup plus rapidement que celles qui ont une membrane plus épaisse, surtout après 800 heures de fonctionnement. Une autre étude a été effectuée par Yuan et al., [76] afin d'identifier les mécanismes de dégradation dans une PEMFC en essayant des membranes Nafion® de différentes épaisseurs et à l'aide de diverses techniques de diagnostic ex-situ. Les résultats indiquent qu'une réduction de l'épaisseur de la membrane et la formation de trous d'épingle, provoquent une augmentation drastique du croisement de l'hydrogène après 800 heures, en particulier pour les membranes plus minces. Le mécanisme de l'amincissement de la membrane peut être compris à travers la simulation de la perte de poids équivalent du Nafion, via la chaîne principale de décompression "main chain unzipping".

La littérature ne rapporte que peu de travaux concernant la caractérisation de stacks PEMFC au cours d'essais de vieillissement accéléré. Ceci est probablement dû au coût élevé de tels essais et au temps nécessaire pour la réalisation de ceux-ci. Néanmoins, parmi les articles publiés dans la dernière décennie sur la dégradation et durée de vie des PEMFC nous pouvons citer [77, 78]. En outre, certains des travaux ont tenté de fournir des procédures de test pour effectuer la caractérisation des FCS [79–82]. La création de normes et des procédures d'essai pour l'évaluation des performances des FCS dans des applications automobiles ont été présentées dans [20, 83, 84]. Dans [85], les auteurs présentent une revue des essais accélérés de durabilité sur l'assemblage membrane-électrodes d'un PEM-FCS. Dhanushkodi et al., [86] utilisent des essais de vieillissement accélérés afin d'évaluer la corrosion du carbone et la dissolution du platine. Une méthode de déconvolution a été développée dans cette étude afin d'extraire les descripteurs de diagnostic servant à lier les performances du système avec les différents modes de dégradation au niveau de la zone active du catalyseur.

2.3.3 Module de pré-traitement des données

Ce module traite les données acquises par les capteurs, il fournit les descripteurs ou paramètres du modèle utiles aux algorithmes de détection, de diagnostic et de pronostic. A partir des données brutes, de nombreuses caractéristiques peuvent être extraites, cette procédure est motivée pour deux raisons : la première est de faire un tri parmi une grande quantité de

données et la deuxième est de sélectionner des éléments représentatifs pour la modélisation du diagnostic des défaillances et le pronostic de l'état futur du système surveillé. Les méthodes pour l'extraction de descripteurs peuvent inclure le filtrage, le fractionnement du signal, ou la transformation du signal temporel vers un autre domaine. Parmi les techniques classiques de prétraitement de données pour les PEM-FCS, nous pouvons citer : l'estimation d'hyperparamètres, la transformée de Fourier, la transformée en ondelettes (WT – Wavelet Transform), les modèles flous, ainsi que les diagrammes de Bode et de Nyquist.

Dans la littérature, de nombreux auteurs soulignent l'utilisation des diagrammes de Nyquist et de Bode pour l'identification des paramètres. Dans [87], les auteurs présentent une méthodologie pour l'estimation et le suivi en temps réel de l'impédance des PEM-FCS. Cette méthodologie a été développée afin de fournir les informations de diagnostic et de gestion de la santé du système. Dans [88], les descripteurs sont extraits des vecteurs construits à partir des mesures des tensions des cellules individuelles d'une PEMFC. Quatre méthodes sont utilisées dans le but de réduire les dimensions et permettant d'extraire les caractéristiques des données de tension, tout en préservant l'information significative de l'ensemble des données brutes. Dans ce travail, deux méthodes de classification supervisées et deux méthodes non supervisées sont utilisées : l'analyse en composantes principales, l'analyse discriminante linéaire de Fisher, et leurs formes non linéaires d'analyse en composantes principales à noyau de Kernel et enfin, l'analyse discriminante de Kernel Fisher. Le but du travail est de comparer la performance de chaque méthode dans le cadre du diagnostic de défaillances, notamment pour la gestion de l'eau dans la PEMFC. La WT est devenu un moyen approprié pour l'extraction de caractéristiques à partir des données brutes. La WT est considérée comme un outil efficace pour l'analyse de l'évolution des signaux transitoires permettant une exactitude de l'information dans le domaine du temps et de la fréquence. Dans [89], les auteurs ont proposé l'utilisation de paquets d'ondelettes pour l'analyse directe du signal de tension continu. L'objectif a été de distinguer l'état de noyage dans une PEMFC.

2.3.4 Module de diagnostic / pronostic

D'une façon générale, nous pouvons considérer la tâche du diagnostic comme la détection et l'identification de l'état ou du mode opérationnel d'un système dans l'instant actuel. À partir

des données recueillies et traitées dans les modules précédents, l'état de fonctionnement du système surveillé est comparé avec un mode de fonctionnement nominal de référence. Le module de diagnostic prend en compte l'évolution du SOH, à partir de propriétés spécifiques de chaque composant, des conditions opératoires de fonctionnement, des sollicitations de puissance, et de l'historique de maintenance du système. Lorsqu'il existe un écart significatif entre ces modes de fonctionnement, ce module permet de détecter, d'identifier et d'isoler les causes et les mécanismes de dégradation. Des méthodes de diagnostic sont nécessaires de manière à : (i) détecter, en temps réel, les signes que provoque une défaillance potentielle dans le système : soit afin d'alerter l'utilisateur de la survenue prochaine d'une défaillance ou de la nécessité d'ajuster les paramètres de fonctionnement, soit afin d'informer le système de régulation et de contrôle pour qu'il corrige par lui-même la dérive en agissant sur ses causes afin de réduire sa durée et son impact sur les performances et la durée de vie de la pile et/ou du système ; (ii) identifier, une fois produite, l'origine d'une défaillance pour renseigner les équipes de maintenance sur les actions nécessaires au redémarrage du système.

Le pronostic est défini comme le processus de prédiction de l'état futur d'un système basé sur son état actuel et ses états précédents [1, 90]. Dans le cas d'absence de défaillances, le module de pronostic a pour objectif la prédiction de l'état futur du système et l'estimation du temps de vie restant avant l'apparition d'une ou plusieurs défaillances [3, 91, 92]. Plus précisément, le pronostic début par la définition d'un point de départ au processus, il permet d'initialiser l'état courant et les performances actuelles du système pour ensuite prédire sa trajectoire. Ensuite, un éventuel seuil d'avertissement, en combinaison avec l'influence des conditions opérationnelles et environnementales, sont pris en compte pour obtenir la durée de vie résiduelle du PEM-FCS donné, ce qui définit un horizon d'observation temporelle dans laquelle la valeur de la trajectoire franchit un seuil. Avec cette information, l'expert déterminera l'instant pour lequel une action de maîtrise sera effectuée afin de rétablir le système dans un état nominal.

Des méthodes de pronostic sont nécessaires pour prédire la trajectoire, de manière la plus proche possible de la réalité, sur laquelle le système évolue vers un niveau critique. L'essentiel porte sur la construction de modèles capables de minimiser l'erreur de prédiction pour un horizon donné. Le modèle de pronostic doit également prendre en considération que toute

dégradation encourue par le système est cumulative, elle se construit vers un seuil au-delà duquel le système ne répondra plus à ses spécifications de conception.

Le pronostic des FCS est un domaine où l’exploration est relativement nouvelle et à ce jour seulement quelques travaux ont été publiés. D’ailleurs, le Data Challenge IEEE PHM 2014 a été lancé en 2014 par l’IEEE Reliability Society, la Fédération de Recherche CNRS FCLAB, l’Institut FEMTO-ST et le laboratoire ACTION. Le défi a été créé dans le but de développer des méthodes robustes de PHM pour évaluer l’état de santé et prédire la durée de vie utile restante d’une PEMFC.

Parmi les travaux trouvés dans la littérature, Zhang et al., [93] proposent l’utilisation de filtres de Kalman pour le suivi de l’état de santé et l’estimation du RUL dans une PEMFC. Les auteurs proposent un modèle de pronostic orienté sur une approche physique ; le modèle permet de trouver un lien entre les conditions de fonctionnement du système et l’indice de dégradation de la surface électrochimiquement active. L’évolution de la taille de cette zone est utilisée comme un critère de vieillissement. Jouin et al., [94] résume l’état actuel des techniques du PHM pour les PEM-FCS. Dans un autre travail, Jouin et al., [95] proposent un modèle de pronostic en temps réel en utilisant un filtre particulaire. L’estimation du RUL d’une PEMFC est obtenue en considérant des distributions de probabilités successives dans les possibles modes de dégradation. La méthodologie est appliquée sur deux ensembles de données, où trois modèles de la chute de tension sont évalués et comparés. Les résultats de la prédiction sont obtenus avec une précision de 90 heures autour de la valeur réelle du RUL, pour une durée de vie de 1 000 heures. D’autre part, le travail présenté dans [96] se focalise dans l’application d’un modèle guidée par les données, l’approche proposée se base sur l’utilisation d’un réseau de neurones récurrents du type “Echo State Networks” pour la prédiction de l’évolution de la dégradation dans un stack de PEMFC.

2.3.5 Module d’aide à la décision

Toutes les fonctions mentionnées dans les modules ci-dessus sont des interprétations de l’état du système. Ces interprétations conduisent à la planification des actions de maîtrise pour maintenir la disponibilité du système, tout en assurant un compromis entre la sécurité et les coûts d’exploitation. Le module d’aide à la décision est associé d’une part, aux stratégies

et plans d'action à prendre avant l'apparition ou propagation ultérieure d'une défaillance et d'autre part, à des mesures correctrices ou de remplacement des composants/sous-systèmes à prendre hors fonctionnement pour assurer le fonctionnement de la pile, en évitant ainsi toute panne et temps d'arrêt opérationnels non planifiés.

Pour des systèmes qui évoluent dans un contexte dynamique, comme les FC-HEV, l'élaboration et la planification d'actions de maîtrise peuvent être abordées une fois les informations de surveillance sur le SOH du PEM-FCS et les conditions d'utilisation dans lequel il évolue sont disponibles. Dans ce cas, l'estimation du RUL dérivé du pronostic peut être prise en compte, le principal défi est d'effectuer cette action avant cette date. Même s'il existe une littérature abondante sur les modèles d'évaluation de décision de maintenance, peu de travaux ont été développés dans le cadre des PEM-FCS. Pour cette raison, dans cette section nous présentons une perspective globale du point de vue de ces systèmes complexes.

La méthode mathématique d'analyse multicritère (AHP – Analytical Hierarchy Process) a été proposée par Winebrake [97] dans le but d'évaluer les systèmes de ravitaillement en hydrogène. L'AHP est une technique d'analyse de décision multi-attributs qui permet aux évaluateurs de fournir des solutions à des problèmes complexes, multicritères et sélectionner des solutions alternatives. Dans leur travail, les auteurs intègrent dans la méthode, une perspective fondée sur une analyse de scénario, afin d'identifier les obstacles à la commercialisation des technologies de l'hydrogène et des FC et soumis à différentes conditions pour des applications automobiles.

Un modèle hiérarchique orienté vers l'utilisation de la méthode AHP pour l'évaluation, la comparaison et l'applicabilité des PEM-FCS dans des applications automobiles a été proposé dans [98]. Sur la base de ce modèle, les auteurs fournissent une synthèse sur la compréhension de la performance globale et représentent les exigences en matière du développement du groupe motopropulseur automobile. L'application expérimentale est réalisée sur quatre PEM-FCS dans le but d'étudier la puissance, l'économie, la fiabilité, la durabilité, la qualité de l'énergie, la réponse transitoire, la sécurité et l'environnement. Les résultats montrent que le modèle hiérarchique peut aider à identifier les sous-performances dérivées des exigences du groupe moto propulseur automobile et représentent de manière cohérente les caractéristiques générales des PEMFC.

2.4 Classification des méthodes pour le PHM des PEM-FCS

Les méthodes pour le PHM peuvent être classées en trois catégories : celles fondées sur les modèles, celles guidées par les données, et les approches hybrides qui combinent les avantages de deux approches précédentes. L'objectif principal de ces approches est de développer un modèle approprié pour évaluer le SOH et estimer le RUL sur une large gamme de conditions de fonctionnement et sur un point quelconque dans le cycle de vie du composant, sous-système ou PEM-FCS. Le choix d'une approche pour le PHM s'effectue par rapport au domaine d'application, la précision des résultats, le coût et la complexité de mise en œuvre [33]. Il est à noter que si de nombreux modèles de PEMFC ont été rapportés pour le diagnostic, seulement quelques-uns sont signalés pour le pronostic.

2.4.1 Approches basées sur des modèles physiques

Ces méthodes supposent qu'un modèle mathématique précis peut être construit à partir de la compréhension physique du système en intégrant les phénomènes de dégradation. Ces modèles offrent généralement des résultats précis mais sont difficiles à construire du fait qu'il est nécessaire d'avoir une connaissance approfondie des modes de défaillance. Comme mentionné dans [11], une compréhension des mécanismes de dégradation dans les composants en intégrant le vieillissement peuvent aider à l'amélioration de la fiabilité dans la conception d'un système. Néanmoins, l'exigence d'une grande quantité des mesures et des efforts de calcul pour la résolution d'équations non linéaires introduit un degré supplémentaire de complexité quant à une mise en œuvre en temps réel.

Lorsqu'on s'intéresse au pronostic de durée de vie, une première approche consiste à s'appuyer sur des modèles analytiques évolutifs du système considéré (ici PEM-FCS). Au cours des dernières décennies, un vaste ensemble de travaux sur les différentes approches basées sur des modèles physiques a été développé pour simuler le comportement des PEM-FCS. On peut citer notamment les modèles électriques équivalents [99, 100], les modèles espace-état [101–103], la modélisation basée sur la représentation énergétique macroscopique [6, 104, 105], les modèles Bond Graph. Même si ces modèles peuvent représenter le comportement de la FC dans une large gamme de conditions de fonctionnement, leur application au pronostic de durée de vie

n'est pas si simple, car il est nécessaire de disposer de l'évolution temporelle de paramètres internes de la pile à combustible.

Ainsi, les approches fondées sur les modèles analytiques ou équivalents n'ont pas été employées dans la prédiction du RUL des PEM-FCS. On peut néanmoins citer des travaux engagés récemment, notamment au sein de la fédération FCLAB [106].

2.4.2 Approches guidées par les données

Ces méthodes utilisent des données du système (i.e. tension, courant, température, etc.). Ces données sont traitées pour comprendre le comportement du système et les phénomènes de défaillance. Dans cette approche, les anomalies et les tendances conformes à un profil sont obtenues de la relation entre les entrées et les sorties du système. Ces grandeurs sont ensuite utilisées pour obtenir des estimations sur le SOH du système et donner une estimation du temps avant défaillance ou RUL [33, 107, 108]. Le principal inconvénient de ces approches basées données est que la performance des prédictions dépend de la quantité et de la qualité des données disponibles [109]. Malgré les faibles efforts de calcul requis par cette approche, le temps d'apprentissage peut donc être long et il est nécessaire de pouvoir disposer de telles données expérimentales.

Dans le but de nous orienter vers un contexte de maintenance prévisionnelle, et plus particulièrement, vers le pronostic, nous nous focalisons par la suite aux techniques de surveillance dynamique par apprentissage automatique⁴ ou “machine learning”. Grâce à un processus d'apprentissage ces algorithmes sont capables de mener un raisonnement qui sera en mesure de bien résoudre une tâche prédéterminée.

Selon le type d'apprentissage qu'ils utilisent, les techniques d'apprentissage automatique peuvent être classées en trois catégories : supervisées, non supervisées et méthodes d'apprentissage par renforcement. (i) **L'apprentissage supervisé** correspond au cas où une cible est déterminée à partir d'exemples auxquels un expert a associé des réponses. Les paramètres du modèle sont donc modifiés de manière à minimiser l'erreur entre la sortie cible (fournie par

4. L'apprentissage automatique est l'une des principales branches de l'intelligence artificielle, qui se consacre au développement d'algorithmes permettant à une machine d'apprendre à partir d'un ensemble d'observations ou données de référence. On considère que ces observations contiennent l'information nécessaire pour résoudre un problème au moyen d'un nombre fini d'opérations.

l'expert) et la sortie réelle du modèle ; (ii) **l'apprentissage non supervisé** correspond au cas où aucune cible n'est prédéterminée, les données fournies en entrée ne contiennent pas d'information sur la sortie désirée et l'algorithme doit découvrir par lui-même la structure. Et finalement ; (iii) **l'apprentissage par renforcement** où l'algorithme développé est capable d'apprendre un comportement étant donné une observation. Il repose sur le principe d'essai/erreur. L'action de l'algorithme sur l'environnement dans lequel il évolue produit une valeur de retour qui guide l'algorithme d'apprentissage.

Les approches guidées par les données ont été mises en œuvre dans les PEM-FCS en utilisant une variété des méthodes d'apprentissage automatique. Il existe de nombreux modèles à base de réseaux de neurones pour différents PEM-FCS : certains sont purement statiques, d'autres intègrent l'évolution dynamique de la pile à combustible. Yousfi-Steiner et al., [110] ont appliqué deux réseaux de neurones récurrents individuels d'Elman afin de détecter l'occurrence du noyage et assèchement dans un PEM-FCS. Jemeï et al., [111] proposent une approche de modélisation de l'ensemble du PEM-FCS en utilisant la méthode des réseaux de neurones. En outre, les approches basées sur l'utilisation de données expérimentales pour construire des systèmes d'inférence neuro-flou adaptatifs (ANFIS – Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) ont été utilisées dans le diagnostic de FCS [112], la prévision de performance (courbe courant-tension) dans une PEMFC [113], ainsi que dans la prédiction de l'état de dégradation d'une PEMFC. Tao et al., [114] développent un système ANFIS à partir des données brutes recueillies sur le stack, les débits des gaz réactifs sont utilisés comme variables d'entrée et la température de fonctionnement de la pile est utilisée comme variable de sortie. Afin de maintenir une valeur de température optimale, un dispositif neuro-flou de commande en ligne a été mis en place pour réguler les débits de gaz dans le PEM-FCS. La validité de l'identification du modèle ANFIS et la bonne performance du contrôleur ont été vérifiées par simulation, les résultats montrent que la méthode ANFIS est applicable pour prédire en temps réel la réponse de la température du PEM-FCS.

Dans [88], les auteurs proposent une approche guidée par les données qui combine l'extraction et la classification des descripteurs. Tout d'abord, les descripteurs sont extraits à partir des données issues de la tension des cellules individuelles. Ensuite, un classificateur est utilisé pour distinguer les caractéristiques des états possibles (i.e. état de fonctionnement en mode

nominal, noyage, et l'assèchement de la membrane). L'objectif est de comparer les performances des trois méthodologies, du point de vue de la précision du diagnostic et le temps de calcul, de manière à obtenir un outil pertinent pour le diagnostic en ligne d'une PEMFC. Ces méthodologies comprennent : un modèle de mélange gaussien, la méthode des k plus proches voisins et les machines à vecteurs de support.

2.4.3 Approche hybride

Les approches hybrides combinent les avantages de deux approches précédentes, ils utilisent la connaissance sur le comportement physique du système et l'information obtenue à partir d'une analyse pertinente des données de surveillance. La combinaison de ces approches offre un moyen pour corrélérer les tendances des données et des événements précurseurs par lesquels se manifeste un mécanisme de dégradation, contribuant ainsi à isoler la cause de défaillance.

Le diagramme de l'approche hybride pour le PHM est illustré sur la Figure 2.7. L'approche présentée ici permet l'utilisation de l'information extraite de deux approches précédentes capables de détecter et isoler les paramètres contributeurs de défaillances. Les paramètres critiques qui y étaient identifiés sont utilisés dans les modèles physiques pour fournir des informations exactes selon le degré du dommage, et de ce fait, établir un moyen efficace pour calculer le RUL du système [11].

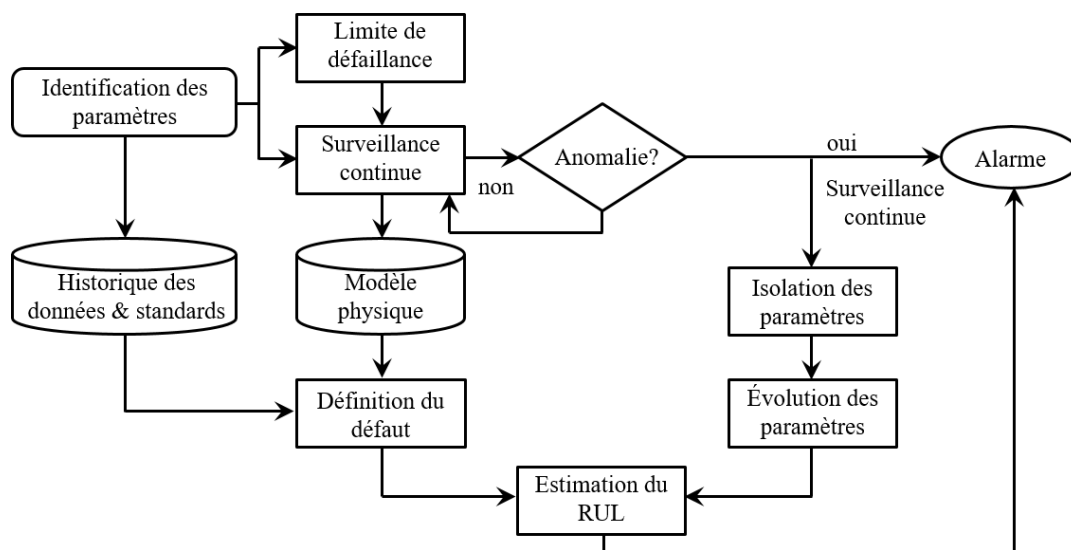


Figure 2.7 – Organigramme de l'approche hybride [11]

2.5 Critères d'évaluation de la performance du pronostic

Les mesures de performance déterminent l'efficacité d'une approche PHM pour une application donnée : le modèle de prédiction est supposé donner une solution fiable et en temps réel sur une vaste gamme de conditions opératoires. Compte tenu de l'objectif principal du pronostic, ces indicateurs fournissent l'information permettant de prendre de bonnes décisions, c'est-à-dire le choix d'actions de maîtrise. Ainsi, un premier ensemble de métriques est celui qui permet de quantifier les risques encourus par le système surveillé. Ce type de métriques correspond aux mesures de pronostic (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 – Mesures de pronostic [1–3]

Critère d'évaluation	Description - Définition
RUL	<p>Durée entre le début de la défaillance et le moment où se produit le défaut. Mesure le processus de dégradation. Cette mesure a une incertitude innée associée à sa valeur prévue.</p> <p>L'estimation du RUL, en soit, ne permet pas augmenter la durée de vie des PEM-FCS : cette mesure apporte une garantie de fonctionnement du système en l'intégrant dans une étape d'aide à la décision.</p>
Confiance	Mesure de confiance construite pour indiquer le degré de certitude du RUL prédit. Cette mesure est représentée par une fonction densité de probabilité (PDF – Probability Density Function).

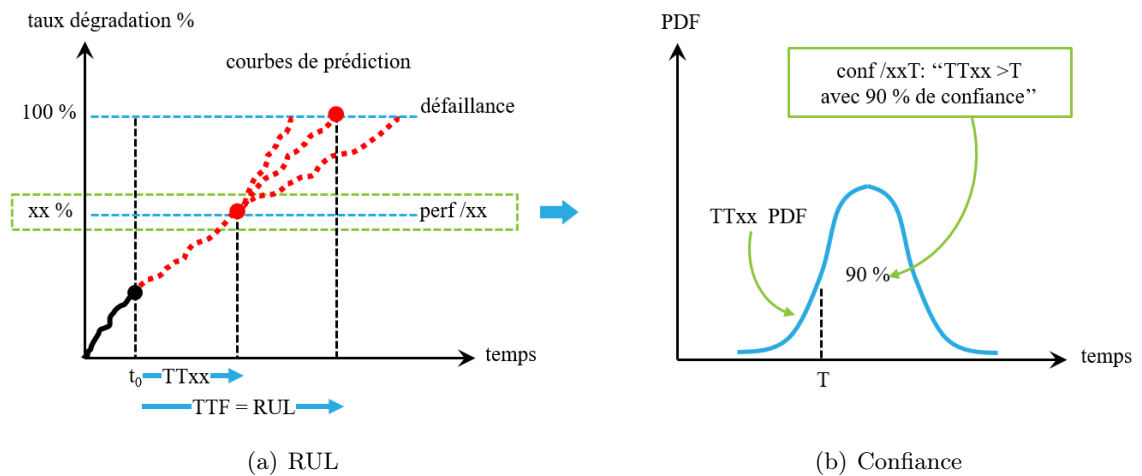


Figure 2.8 – Mesures de pronostic

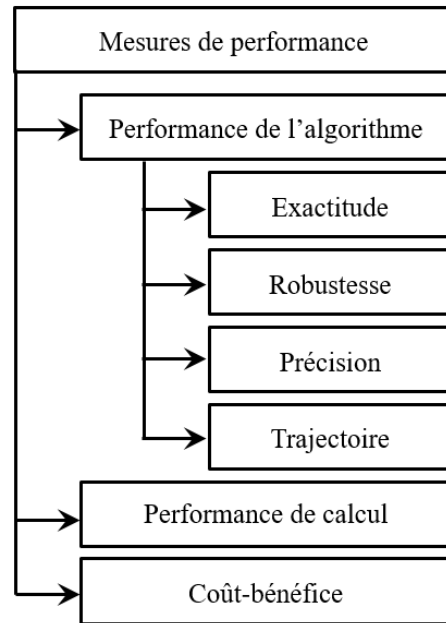


Figure 2.9 – Indicateurs pour mesurer la performance des algorithmes de pronostic [12]

La Figure 2.8 présente les mesures de pronostic, où TT_{xx} est le temps restant pour dépasser la limite de performance $perf/xx$, et $conf/xxT$ est la confiance avec laquelle l'indication $TT_{xx}/T > T$ peut être prise.

En général, la performance des algorithmes peut être mesurée en évaluant l'erreur entre la différence de la valeur réelle et prédite du RUL. La précision dans le calcul de l'erreur dépend de la quantité des données. Plusieurs indicateurs émergent de la littérature pour mesurer la performance des algorithmes de pronostic [12, 115–117]. Saxena et al., [12] fournissent un bilan complet des métriques pour évaluer la performance des algorithmes de pronostic (voir Figure 2.9). Ces indicateurs peuvent être classifiés dans trois catégories : évaluateurs de performance de l'algorithme (y compris l'exactitude, la précision, l'opportunité et la robustesse); évaluateurs de performance computationnelle; et les évaluateurs du coût-bénéfice. Les évaluateurs de performance de l'algorithme de pronostic sont inclus dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Mesures de performances du système de pronostic [1, 4]

Critère d'évaluation	Description - Définition
Exactitude	<p>Mesure la proximité de la date de défaillance prévue avec la date de défaillance réelle. L'exactitude est grande (proche de 1) quand la valeur prévue est identique à la valeur réelle et diminue quand la valeur prévue dévie de la valeur réelle.</p> $\text{Accuracy} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T e^{\frac{ \text{RUL}_{\text{real}}(t) - \text{RUL}(t) }{\text{RUL}_{\text{real}}(t)}} \quad (2.1)$ <p>où $\text{RUL}_{\text{real}}(t)$ est la valeur réelle du RUL, $\text{RUL}(t)$ est la valeur prédite du RUL au temps t et T est la longueur des prédictions.</p>
Précision	<p>Exprime le degré de reproductibilité. La précision est une mesure de dispersion des prédictions. Elle permet d'évaluer comment les valeurs prédites sont groupées autour de l'intervalle dans lequel survient la défaillance. La précision dépend fortement du niveau de confiance et de la distribution des prédictions.</p> $\text{Precision} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\varepsilon(t) - \bar{\varepsilon})^2}{T}} \quad (2.2)$ <p>où $\varepsilon(t) = \text{RUL}_{\text{real}}(t) - \text{RUL}(t)$ et $\bar{\varepsilon} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \varepsilon(t)$ est la longueur des prédictions.</p>
Opportunité	<p>L'opportunité ou "timeliness" est la position relative de la fonction de densité de probabilité du modèle de pronostic par rapport à l'apparition de l'évènement de défaillance.</p>
Robustesse	<p>Exprime la qualité d'être en mesure de résister aux changements de l'entrée ou des perturbations externes telles que les conditions environnementales.</p> $S(i) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left\{ \frac{\Delta M^l(i)}{\Delta_{\text{input}}} \right\} \quad (2.3)$ <p>où S représente la sensibilité, ΔM est la distance mesurée entre deux sorties successives pour la valeur de métrique M et Δ_{input} est la distance entre deux entrées successives.</p>

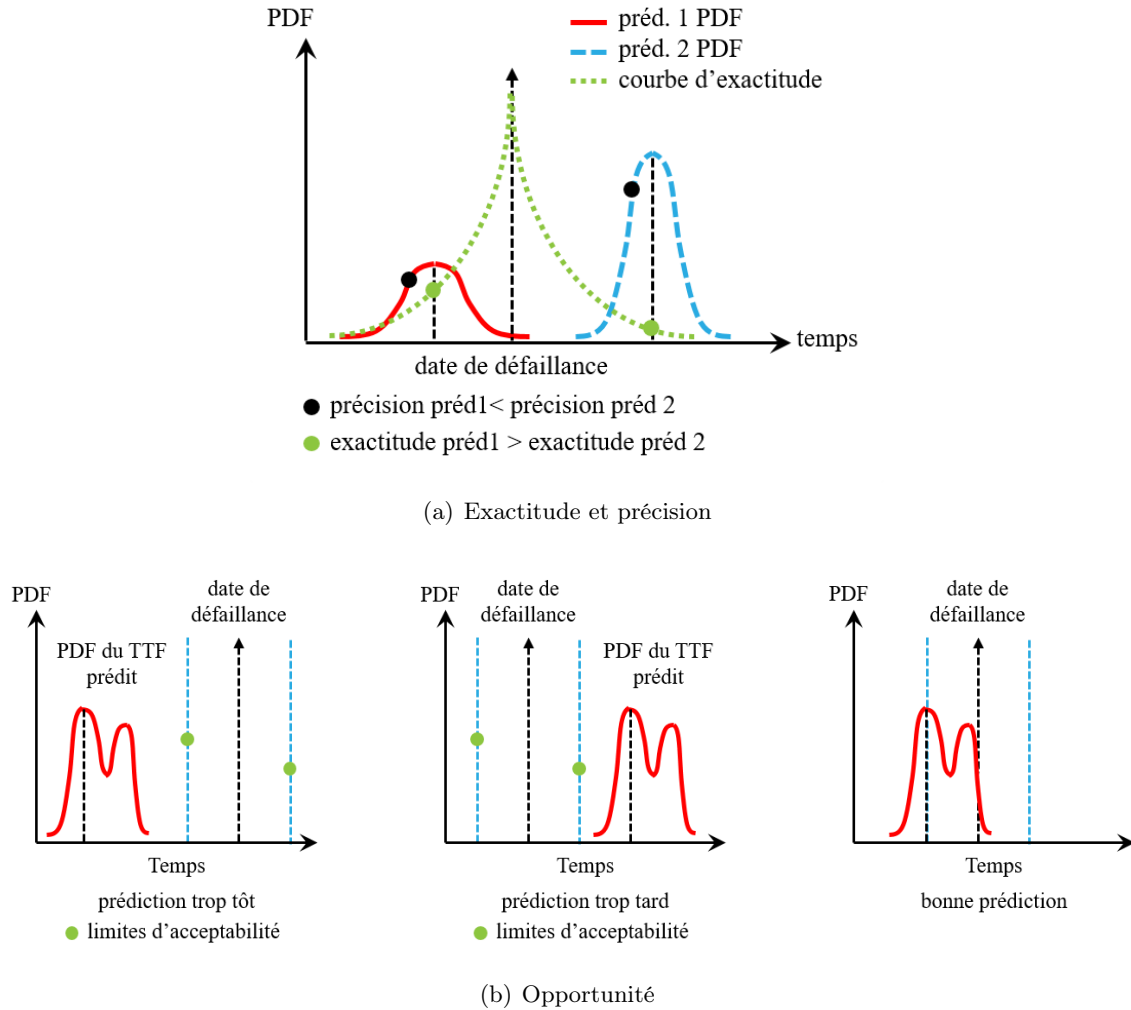


Figure 2.10 – Mesures de performances du système de pronostic [1]

La Figure 2.10(a) présente la complémentarité de l'exactitude et de la précision, tandis que la Figure 2.10(b) présente le concept d'opportunité : d'un point de vue de performance, toute prédiction en dehors des limites d'acceptabilité est considérée comme inacceptable.

En complément, l'analyse coût-bénéfice pour les systèmes PHM est destinée à être un outil d'aide à la prise de décisions. Il est nécessaire d'aborder les problèmes économiques liés à la conception, au développement et à la mise en œuvre des technologies PHM pour justifier leur investissement [13]. Les indicateurs de rentabilité qui apparaissent dans le Tableau 2.3, sont destinés à mesurer le bénéfice apporté par les méthodes PHM. Ces indices sont influencés par la précision avec laquelle le RUL est prévu. Le schéma de la Figure 2.11 présente, sous la forme d'un diagramme, les étapes subséquentes d'une analyse du coût-bénéfice.

Tableau 2.3 – Indicateurs du coût-bénéfice

Critère d'évaluation	Description - Définition
Retour sur investissement	Compare le montant d'argent gagné ou perdu par rapport à la somme initiale investie contre le coût de développement, fabrication et installation de la technologie sur l'élément sélectionné.
	$ROI = \frac{\text{benefit gain} - \text{coût de la technologie}}{\text{coût de la technologie}} \quad (2.4)$
Période d'amortissement	Quantité de temps qu'il faudrait pour couvrir le coût de l'investissement initial dans la technologie PHM.
	$PA = \frac{\text{coût de la technologie}}{\text{prestation mensuelle}} \quad (2.5)$
Coût du cycle de vie	Coût cumulé d'un produit tout au long de son cycle de vie.
	$LCC = \text{coût d'acquisition} + \text{coûts d'opération} \quad (2.6)$

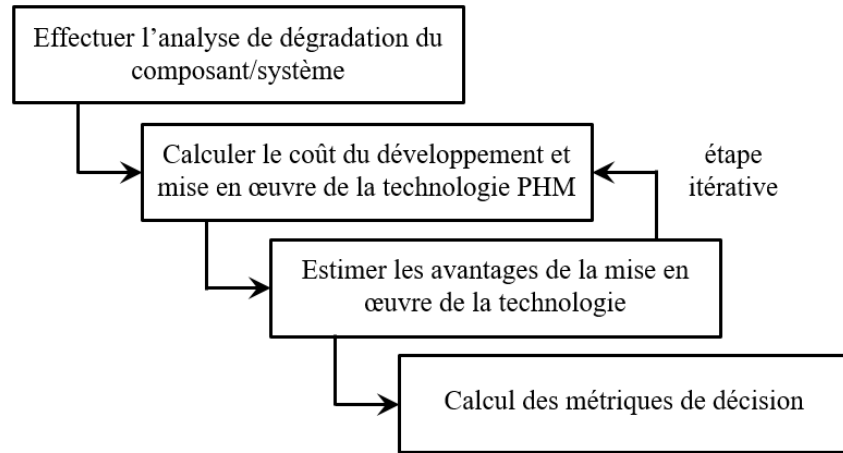


Figure 2.11 – Étapes systématiques pour l'analyse coût-bénéfice [2, 13]

2.6 Enjeux et défis du PHM pour les PEM-FCS

Malgré un progrès technique important au cours des dernières années, il existe encore de nombreux défis en matière de recherche dans la construction d'outils robustes du PHM pour les PEM-FCS. Parmi les principaux défis à relever figurent la conception des systèmes d'acquisition des données permettant de visualiser et de modifier les paramètres en fonction

des mesures désirées en temps réel, la sélection des meilleures méthodes applicables au PHM, le traitement des incertitudes issues de l'étape du pronostic, et l'analyse coût-bénéfice pour la décision de la mise en œuvre des outils PHM [107].

2.6.1 Conception optimale des systèmes de capteurs

Comme mentionné dans la Section 2.3.2, le processus d'acquisition de données est une partie essentielle de l'architecture PHM. Les capteurs sont des sources d'informations importantes servant à corréler des mesures avec le degré de propagation du défaut d'intérêt. Néanmoins, ces capteurs complexifient le système, augmentant son coût et diminuant sa fiabilité. La connaissance des valeurs de paramètres de fonctionnement avec un rapport signal-bruit permet l'évaluation précise de l'état actuel et la prédiction du comportement futur du système complexe. L'acquisition de mesures imprécises, résultant de la sélection et/ou localisation incorrecte des capteurs ou de mesures insuffisantes, peut dégrader la performance des algorithmes. Il est également nécessaire de créer une approche pour dégager un compromis sur le nombre de capteurs, en termes de précision, sensibilité, stabilité, consommation d'énergie, fiabilité et sur la question de la mise en réseau de ces capteurs [107].

2.6.2 Sélection des méthodes applicables pour le PHM

Chaque pile à combustible présente un profil unique de dégradation propre à l'environnement d'exploitation (historique d'utilisation, conditions de fonctionnement, ...). Il faut noter le problème de non-uniformité des productions de PEMFC actuelles. Ainsi, un même test (de vieillissement par exemple) effectué sur deux PEMFC "identiques" d'une même série aura des résultats sensiblement différents. Ce point est critique pour la mise en œuvre d'une approche PHM adaptée aux PEM-FCS, il représente un défi aussi bien que une opportunité d'améliorer la fiabilité de ces systèmes et de mieux positionner les politiques de maintenance prévisionnelle. Par conséquent, il est important d'effectuer un choix stratégique des méthodes PHM permettant de capitaliser des connaissances sur un système pour les réutiliser sur un autre.

De plus, beaucoup de travaux se focalisent sur le pronostic au niveau d'un composant, ce type d'approche peut s'avérer une bonne solution, mais il est efficace à un problème spécifique. La prise en compte du développement d'algorithmes PHM intégrant une approche globale

du système, assure la réalisation de fonctionnes et garanti une meilleure performance. En outre, l'utilisation de multiples algorithmes dans l'architecture PHM représente un défi pour les développeurs en termes d'intégration et d'interfaçage de différents composants, y compris logiciel et matériel informatique [118].

2.6.3 Gestion de l'incertitude

Le défi posé par la conception des systèmes PHM consiste à minimiser l'incertitude dans les méthodes de diagnostic et de pronostic. Étant donné que le pronostic dépend de divers facteurs, tels que : la connaissance disponible sur le comportement et la complexité du système surveillé, ainsi que à partir de l'historique des modes de fonctionnement passées, et de l'état courant des conditions opérationnelles et environnementales, la représentation et la gestion de l'incertitude à tous les stades du processus PHM est essentielle pour la prise de décisions réalistes. L'incertitude peut provenir : du système, du bruit dans les mesures, des incertitudes des modèles, et de données d'apprentissage manquantes ou indisponibles [119]. Les erreurs de pronostic peuvent conduire, d'une part, à une maintenance préventive inutile en raison de la sous-estimation du RUL (fausses alarmes), et d'autre part, aux défaillances inutiles et même catastrophiques dans le système dues à une surestimation du RUL [107]. On comprend néanmoins aisément que si le RUL est entaché d'erreur, il est préférable de sous-estimer (un peu ...) celui-ci que de le surestimer (même de quelques heures ...). Ce point se traite dans la fonction de coût associé à la décision.

2.6.4 Validation et vérification

La modélisation des PEM-FCS a été étudiée par plusieurs auteurs et par des approches différentes. Dans le domaine automobile, la validation expérimentale des algorithmes PHM développés est nécessaire pour garantir une architecture embarquée temps-réel sûr. Ainsi, il est important de tenir compte de la forte interaction entre les méthodes de conception logicielle, les méthodes de conception matérielle et leur contrôle. La conception matérielle est très dépendante des fonctionnalités et les caractéristiques attendues définies par l'algorithme développé. Optimiser les performances du système embarqué, par le biais d'une utilisation efficace des ressources assure l'exécution des opérations visées et permet minimiser son coût.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux éléments essentiels permettant de mieux comprendre les travaux qui seront exposés dans la suite du manuscrit. Le principal objectif a ainsi consisté à proposer des stratégies pour prolonger la durée de vie des PEM-FCS. Pour ce faire, les fortes interactions entre la pile et ses auxiliaires ont été soulignées par une description des principales défaillances et mécanismes de dégradation s’y déroulant dans chaque sous-système. Nous soulignons qu’un effort particulier devrait être consacré sur l’interface d’électronique de puissance et la conception du système de traction électrique pour atteindre les résultats souhaités au niveau de performance. Pour couvrir la consommation d’énergie des composants auxiliaires, ainsi que la demande de puissance de la charge, la PEMFC doit être hybridée avec un système de stockage d’énergie. Nous avons vu que le couplage du système peut être entrepris avec des convertisseurs DC/DC en cas d’une hybridation active ou sans convertisseurs DC/DC en cas d’une hybridation passive.

Fort de cette problématique, nous avons exposé la démarche générale que nous avons retenue pour la traiter. Elle consiste d’une part à proposer une stratégie dite “logicielle” qui vise à augmenter et maîtriser la durée de vie du PEM-FCS par le développement et la mise en œuvre d’un module de surveillance, pronostic et gestion de l’état de santé du système ; et d’autre part à proposer une stratégie dite “matérielle” dédiée à l’étude de l’hybridation passive de la PEMFC avec des UCs de façon à faire fonctionner la pile au plus proche de ses conditions opératoires optimales et à minimiser l’impact des défaillances dues à l’étage électronique de puissance.

Le PHM des PEM-FCS est à un stade de développement relativement peu avancé, même si d’importants progrès ont déjà été réalisés dans le domaine du diagnostic, il faudra déployer des efforts supplémentaires dans le cadre du pronostic de défaillances et de l’aide à la décision. À cet égard, ce chapitre a présenté un ensemble de points relatifs au PHM dans le domaine des PEMFC pour donner une vision unifiée. Nous avons présenté un aperçu des principales réalisations dans le domaine du PHM pour les PEM-FCS. Notre objectif a été de révéler les enjeux, défis et opportunités auxquels fait face la recherche actuelle dans ce domaine. En outre, nous avons donné une idée précise sur l’état de l’art des méthodes de pronostic qui peuvent

être appliquées aux PEM-FCS en réponse aux facteurs qui ont une influence sur sa fiabilité. Les approches basées sur un modèle physique utilisent des modèles mathématiques précis, les résidus qui captent la différence entre les mesures du système réel et les sorties du modèle mathématique sont utilisés pour détecter d'éventuelles défaillances. Cependant, le développement des modèles complets et exacts, traduisant le comportement du système complexe sous forme d'équations, peut être pratiquement impossible. Envisager un modèle complet du comportement du PEM-FCS intégrant les modes de défaillance existants, les taux de dégradation au niveau du composant et/ou système et les effets du vieillissement se produisant à chaque instant de sa vie utile est un grand défi à l'heure actuelle.

Sur cette base, le cadre de travail envisagé dans le troisième chapitre se centre sur une approche guidée par les données. Ici les données recueillies sont la seule source pour l'étude et la compréhension du comportement (y compris la dégradation) du système. Ils sont plus adaptés que les approches basées sur un modèle physique, l'hypothèse de base de cette approche est que les caractéristiques statistiques des données sont relativement stables jusqu'à ce qu'un événement de défaillance se produise dans le système. Néanmoins, son principal inconvénient est que la performance des prédictions dépend étroitement de la quantité et de la qualité des données.

Chapitre 3

Augmentation de la durée de vie des PEM-FCS en utilisant une approche logicielle : PHM

Ce chapitre vise à prédire le comportement de la tension dans une pile à combustible (FC – Fuel Cell) fonctionnant en mode nominal. Il présente la mise en œuvre d’une méthodologie de prédiction basée sur une approche guidée par les données qui utilise comme entrée la mesure de la tension de deux stacks sur un essai en longue durée (1 000 heures). D’abord, nous proposons un procédé pour réduire l’erreur dans les prédictions ; comme la tension ne peut pas être représentée sous la forme d’un signal périodique, nous proposons de diviser ce signal en deux composantes : la variation temporelle de la tension en mode de fonctionnement nominal et les perturbations externes associées (i.e. lorsque la pile est démarrée). La deuxième composante ne peut être prédite et elle n’est donc pas utilisée pour l’apprentissage du modèle de prédiction. Cette technique de prétraitement est mise en place afin d’améliorer la performance du modèle de prédiction basée sur un système d’inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS – Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). Ce chapitre se termine par une analyse sur le choix des différents paramètres de conception du modèle de prédiction influant sur la qualité de l’estimation.

Les contributions apportées dans ce chapitre sont les suivantes : (i) notre contribution principale dans cette recherche consiste à la conception et la réalisation d’un modèle de prédiction

pour la dégradation d'un système pile à combustible (FCS – Fuel Cell System) de type à “membrane échangeuse de protons” (PEM – Proton Exchange Membrane) permettant de calculer le temps de vie utile avant défaillance. L'architecture du système de prédiction est définie en considérant non seulement la précision du système mais également son aptitude à être mis en œuvre dans une approche en temps réel; (ii) comme seconde contribution, nous présentons un procédé pour réduire l'erreur dans les prédictions. Nous proposons de diviser le signal en deux composantes : la tension due à un fonctionnement en mode nominal et une deuxième partie causée par des perturbations externes; (iii) les résultats des prédictions sont analysés autour de l'influence des paramètres permettant de trouver un compromis entre performance du modèle et temps de calcul.

3.1 Mise en contexte

Comme vus précédemment, le PEM-FCS est un système complexe qui se caractérise par l'hétérogénéité de ces éléments et par leurs fortes interactions, son fonctionnement entraîne des dégradations importantes sur le cœur de pile et/ou les auxiliaires. Décrire l'évolution du système d'un état de marche vers un état de panne est possible grâce au processus de pronostic. De toute évidence, le pronostic à long-terme est nécessaire du fait qu'un horizon de temps prolongé permet la planification des actions de maîtrise plus adéquats.

Dans notre étude, la méthodologie de prédiction se base sur la tension du stack parce qu'il est le plus simple indicateur et le plus direct, permettant de surveiller l'état de santé (SOH – State Of Health) du stack et la performance du système, sa mesure est non intrusive et le coût de sa mise en œuvre est abordable. De plus, la plupart des modes de défaillance (réversibles ou irréversibles) ont un impact sur cette grandeur physique, qui à son tour, est fortement dépendante des conditions opératoires et environnementales, de son historique de fonctionnement et des effets de vieillissement. En d'autres termes, la tension du stack peut être considérée comme un capteur du SOH à l'intérieur du cœur de la PEMFC.

La tension du stack est prise comme indicateur de dégradation. Cette mesure sera représentée sur le cas simple d'une série temporelle et inclus dans une méthodologie de prédiction, cela fournira une estimation de la détérioration future. Tel que défini dans le deuxième chapitre,

après une dégradation, la pile ne peut pas retrouver ses performances initiales, sans intervention extérieure. Prédire la dégradation permet de détecter tout changement de comportement du système à chaque fois qu'une caractérisation de son évolution future est disponible.

La prédiction des séries temporelles est un domaine de recherche actif en raison du vaste champ d'applications tel que les marchés financiers, les prévisions météorologiques, la médecine, entre autres. Une série temporelle est une séquence chronologique d'observations sur une variable particulière notée $S_t = \{y_1, y_2, \dots, y_t\}$, dans laquelle chaque observation y_t est enregistrée à un moment donné (pour $t = 1, 2, \dots, n$). La prédiction des séries temporelles vise à estimer les valeurs futures en utilisant un ensemble des valeurs des variables explicatives, ou régresseurs de données, ou d'observations historiques sur un horizon de temps convenable. Ces régresseurs, de taille fixe, contiennent les valeurs observées de la série et sont supposés contenir le maximum d'informations disponible pour réaliser une prédiction aussi précise que possible. Ils sont utilisés pour l'apprentissage du système de prédiction jusqu'à l'instant n , qui à son tour modélise la relation entre la valeur future et les valeurs précédentes de la série temporelle. La valeur fournie par le modèle sera une estimation de la valeur à l'instant $n + 1$.

La prédiction d'une série temporelle à plusieurs pas (MSP – Multi-Step ahead Prediction) semble pertinente pour effectuer des estimations à long-terme, vis-à-vis d'un objectif de maintenance prévisionnelle. Indépendamment de la nature des modèles utilisés, la procédure peut être réalisée de différentes manières :

3.1.1 La stratégie Récursive

Dans cette stratégie, un modèle unique F est formé pour effectuer la prédiction à un pas (one-step ahead prediction). La stratégie Récursive peut être décrite sous la forme de l'Équation suivante :

$$\hat{y}_{t+1} = F(y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-d+1}, \Theta) \quad (3.1)$$

avec $t \in \{d, \dots, N - 1\}$.

où d dénote le nombre de valeurs précédentes (régresseurs) de la série temporelle utilisée, F est le modèle utilisé pour effectuer la prédiction et Θ désigne l'ensemble des paramètres nécessaires pour le modèle F .

Ensuite, en utilisant le même modèle, les valeurs prédites des données connues seront utilisées pour prédire les valeurs futures de la série :

$$\hat{y}_{t+2} = F(\hat{y}_{t+1}, y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-d+2}, \Theta) \quad (3.2)$$

Dans l'Équation (3.2), la valeur prédite de \hat{y}_{t+1} est utilisée au lieu de la valeur réelle pour effectuer la prédiction de \hat{y}_{t+2} . Les estimations fournies par le modèle, pour le pas de temps suivant, sont renvoyés à l'entrée du modèle H fois jusqu'à ce que la valeur de prédiction souhaitée \hat{y}_{t+H} soit atteint. Lorsque l'horizon de prédiction est égal au nombre de valeurs passées d dans le modèle, les entrées ne sont que des approximations et aucune observation utilisée constituera une valeur réelle de la série temporelle.

En fonction de la quantité du bruit présent dans les données et de l'horizon de prédiction, la stratégie Récursive peut diverger du comportement souhaité. En effet, l'accumulation des erreurs diminue la précision du modèle au moment où toutes les entrées sont constituées des valeurs prédites. De plus, au fur et à mesure que l'horizon de prédiction augmente, l'incertitude sera plus élevée. En dépit de ce problème, l'avantage de la stratégie Récursive est la simplicité : un seul modèle est construite pour effectuer la MSP.

3.1.2 La stratégie Directe :

La stratégie Directe estime H modèles entre chaque entrée et sortie, le modèle F_h et l'ensemble de paramètres Θ_h est développé indépendamment des autres pour chaque horizon de prédiction. L'Équation (3.3) décrit la stratégie :

$$\hat{y}_{t+h} = F_h(y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-d+1}, \Theta_h) \quad (3.3)$$

avec $t \in \{d, \dots, N - H\}$ et $h \in \{1, \dots, H\}$.

Ceci implique que la stratégie Directe ne utilise pas des valeurs prédites pour calculer des valeurs futures, et pour tant les erreurs dans la sortie sont propres du modèle lui-même et ne sont pas accumulés. Cependant, cette stratégie augmente la complexité de la prédiction, car les valeurs de \hat{y}_{t+1} jusqu'à \hat{y}_{t+H} , doivent être prédites avec H modèles différents. De plus, la

stratégie Directe exige un grand temps de calcul, car pour chaque étape de prédiction il faut construire un modèle distinct et optimiser les paramètres d'apprentissage, ce qui pouvait à son tour diminuer la précision dans les estimations.

3.1.3 La stratégie DirRec :

La stratégie DirRec est une combinaison des stratégies Récursive et Directe. Cette stratégie utilise un modèle distinct de prédiction F_h pour chaque horizon H , et introduit les estimations provenant des étapes précédentes comme un nouveau ensemble d'entrées. Dans l'exemple suivant, quatre valeurs précédentes de la série temporelle S_t sont utilisées comme entrée du modèle. Sur cette base, la stratégie DirRec peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\hat{y}_{t+1} &= F_1(y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-d+1}, \Theta_1), \\ \hat{y}_{t+2} &= F_2(\hat{y}_{t+1}, y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-d+1}, \Theta_2), \\ \hat{y}_{t+3} &= F_3(\hat{y}_{t+2}, \hat{y}_{t+1}, y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-d+1}, \Theta_3), \\ &\vdots\end{aligned}\tag{3.4}$$

avec $t \in \{d, \dots, N - H\}$ et $h \in \{1, \dots, H\}$.

Compte tenu que les estimations prises comme données d'entrée du modèle augmentent au fur et à mesure l'horizon de prédiction augmente, ceci peut introduire un degré d'erreur considérable tel que dans la stratégie Récursive. De plus, la stratégie implique la construction et paramétrisation d'un modèle unique pour chaque étape, comme dans la stratégie Directe. Même si la stratégie DirRec présente une complexité importante, si la sélection des entrées est prise en compte et le modèle est assez précis, les estimations peuvent apporter encore plus d'information pour la prédiction que les stratégies précédentes.

3.1.4 La stratégie MIMO

Contrairement aux trois stratégies précédentes où les modèles sont traités indépendamment et les estimations constituent une valeur scalaire, la stratégie multi-entrées multi-sorties (MIMO – Multi-Inputs Multi-Outputs) apprend un modèle F à multiples sorties, à partir d'un ensemble de données, et renvoie un vecteur de valeurs futures en une seule étape. Cette

stratégie peut être décrite comme suit :

$$(\hat{y}_{t+H}, \dots, \hat{y}_{t+2}, \hat{y}_{t+1}) = F(y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-M+1}, \Theta) \quad (3.5)$$

La stratégie MIMO fourni les estimations avec un temps de calcul faible. Néanmoins, elle impose une contrainte de flexibilité, car elle utilise la même structure du modèle et le même ensemble de données d'entrée sur tous les horizons de prédiction.

3.1.5 La stratégie MISMO

Cette stratégie se compose de plusieurs modèles à sorties multiples (MISMO – Multi-Inputs Several Multi-Outputs) et d'un paramètre de réglage s qui détermine le nombre de sorties pour toutes les structures MIMO. L'Équation (3.6) et l'Équation (3.7) décrivent le principe de la stratégie :

$$(\hat{y}_{t+ps}, \dots, \hat{y}_{t+(p-1)s+2}, \hat{y}_{t+(p-1)s+1}) = F_p(y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-M+1}, \Theta_p), \quad (3.6)$$

où :

$$n = \frac{H}{s}, p \in \{1, \dots, n\} \quad (3.7)$$

Autrement dit, s représente l'ensemble de variables de sortie à prédire, en même temps et par le même modèle à multiples sorties, et p dénote le nombre et les paramètres des modèles. L'avantage de la stratégie MISMO est que les horizons de prédiction sont sélectionnés ensemble pour toutes les entrées du modèle. L'ensemble de variables de sortie s reste indépendant des autres ensembles, ce qui permet une mise en œuvre directe et rapide des calculs en parallèle.

Dans ce chapitre, notre attention se focalisera sur la stratégie Récursive, car elle est la plus simple à mettre en œuvre et offre un bon compromis entre précision et complexité. En complément, cette stratégie est la seule étant en mesure de prédire à long-terme. La phase de prédiction constitue une étape essentiel du pronostic, l'outil de modélisation doit faciliter l'estimation d'un comportement dégradante de manière précise et dans un temps opportun.

En ce qui concerne les approches guidées par les données, nous sommes intéressés aux modèles adaptatives issus du domaine de l'apprentissage automatique. Pour être plus pré-

cis, les systèmes ANFIS sont ici retenus car ils ne nécessitent pas de modèles mathématiques complexes, ils sont rapides et adaptatifs et l'outil de prédiction peut être mis en œuvre en ligne [120–122], ce qui est essentiel pour le PHM des PEMFC, notamment pour des applications automobiles. En outre, les systèmes neuro-flous permettent la modélisation non-linéaire par apprentissage dynamique, l'auto-apprentissage et sont capables de prendre en compte l'expérience humaine. Par ailleurs, ces systèmes sont capables d'intégrer la connaissance incertaine ou imprécise des données d'apprentissage.

Les approches basées sur l'utilisation de données expérimentales pour construire des systèmes ANFIS ont été utilisées dans une variété d'applications médicales [123–125], moteurs électriques [126–128] et le diagnostic des PEM-FCS [112, 129]. De plus, les systèmes neuro-flous ont été utilisés pour la prévision de performance (courbe courant-tension) dans une PEMFC [113]. En outre, différents travaux de recherche ont démontré que ANFIS est adapté pour la prédiction de séries temporelles telles que Mackey-Glass [130–132], Box-Jenkins [130], les systèmes d'oscillation forcée de Duffing [131], la vitesse et la direction du vent [133, 134], les systèmes énergétiques [135] ou l'historique de dégradation des machines [136, 137].

3.2 Systèmes d'inférence neuro-flous adaptatifs

La logique floue est une technique de calcul qui utilise des étiquettes linguistiques pour représenter les valeurs numériques. Les systèmes basés sur la logique floue sont construits à partir d'une collection de règles floues "si-alors" et de fonctions d'appartenance (MF – Membership Function) qui définissent la relation entre les variables d'entrée et de sortie du système. Les règles floues et les MFs sont définies soit à l'aide de la connaissance humaine ou à l'aide des données du système qui définissent la relation entre les variables d'entrée et de sortie. Considérant la complexité et le manque d'expertise dans l'estimation de la durée de vie d'une PEMFC, la conception d'un système flou pour prédire la perte de performance en fonction de l'expérience humaine est difficile. Par conséquent, la conception d'un tel système doit être effectuée en utilisant des données expérimentales.

Les systèmes ANFIS sont une classe de réseaux adaptatifs introduite par Jang et al., [138], ils peuvent être considérés comme une structure de réseau de neurones à action directe, où

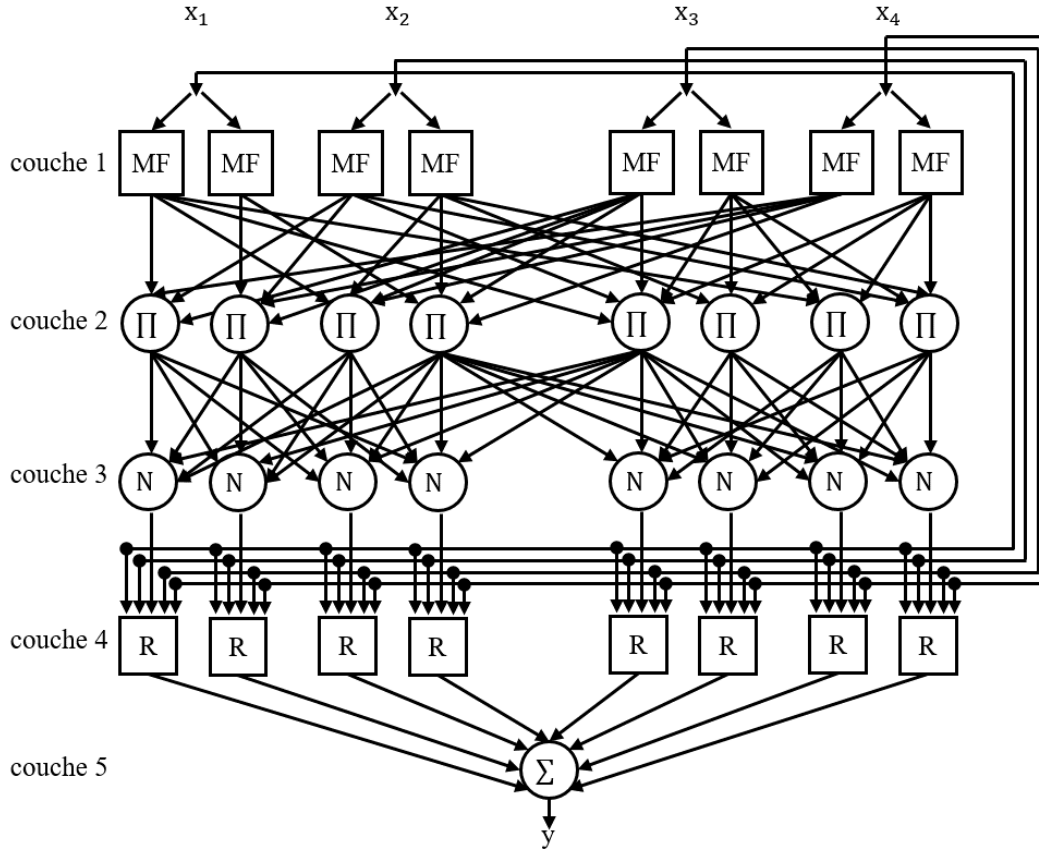


Figure 3.1 – Structure du système d'inférence neuro-flou adaptatif

chaque couche est un composant du système neuro-flou. Autrement dit, ces systèmes sont essentiellement des systèmes basés sur la logique floue, où les règles et les MFs sont optimisées par l'intermédiaire d'un réseau de neurones.

La Figure 3.1 décrit l'architecture du système ANFIS et explique brièvement le processus d'apprentissage et d'inférence. Le réseau ANFIS est composé de cinq couches : un nœud dans la même couche exécute des fonctions du même type ; il est à noter que le cercle indique un nœud fixe tandis que le carré indique un nœud adaptatif (les paramètres sont modifiés au cours du processus d'apprentissage). Si la couche d'entrée est composée de quatre variables d'entrée nettes $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, et deux MFs sont assignées à chaque variable d'entrée, donc 16 règles sont formulées pour l'opération d'inférence floue R_j (2^4). Ces règles sont représentées sous une forme générale de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
R_j : & \text{ si } (x_1 \text{ est } A_1^j) \text{ et } (x_2 \text{ est } A_2^j) \text{ et } (x_3 \text{ est } A_3^j) \text{ et } (x_4 \text{ est } A_4^j) \\
& \text{ alors : } y_j = c_1^j x_1 + c_2^j x_2 + c_3^j x_3 + c_4^j x_4 + c_5^j
\end{aligned} \tag{3.8}$$

où $j = 1, \dots, 16$ est le numéro de la règle, y_j est le résultat de la sortie en fonction de la $j^{\text{ème}}$ règle floue, A_i^j est l'ensemble flou associé à la $i^{\text{ème}}$ variable d'entrée dans la $j^{\text{ème}}$ règle floue, et c_k^j est la conséquence ou le paramètre qui est déterminé au cours du processus d'apprentissage ; ici, $i = 1, 2, \dots, 4$ et $k = 1, 2, \dots, 5$.

Couche 1 : dans cette couche, chaque nœud génère une degré d'appartenance de la variable linguistique. Par exemple, la fonction de nœud du $i^{\text{ème}}$ nœud peut être une MF gaussienne généralisée :

$$y_j^{(1)} = \mu_{A_i^j}(x_i) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_i - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \tag{3.9}$$

où A_i^j est l'étiquette linguistique associée à la position $i^{\text{ème}}$ de la variable d'entrée x_i dans la $j^{\text{ème}}$ règle floue, et (a_i, b_i, c_i) sont l'ensemble des paramètres qui modifie la forme des MFs et sont appelés paramètres prémisses.

Couche 2 : dans cette couche, chaque nœud est un cercle labélisé \prod , où la sortie représente les degrés d'activation de la $j^{\text{ème}}$ règle floue calculée comme le produit des degrés d'appartenance. La sortie peut être représentée par l'équation suivante :

$$y_j^{(2)} = \omega_i = \prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^j}(x_i) \tag{3.10}$$

Couche 3 : cette couche normalise les degrés d'activation de chaque règle, ici le $i^{\text{ème}}$ nœud calcule le rapport du $j^{\text{ème}}$ degré d'activation sur la somme de tous les degrés d'activation des règles :

$$y_j^{(3)} = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^4 \omega_i} \tag{3.11}$$

Couche 4 : chaque nœud dans cette couche est adaptatif, la sortie est constituée d'une combinaison linéaire des entrées, multipliée par les degrés d'activation normalisés ω :

$$y_j^{(4)} = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (c_1^j x_1 + c_2^j x_2 + c_3^j x_3 + c_4^j x_4 + c_5^j) \tag{3.12}$$

Où $\bar{\omega}_i$ est la sortie de la couche 3, et $(c_1^j, c_2^j, c_3^j, c_4^j, c_5^j)$ désigne un ensemble de paramètres inconnus appelés : paramètres conséquents.

Couche 5 : cette couche fait la défuzzification, elle calcule les résultats globaux comme la somme de tous les signaux entrants, et ce nœud est représenté comme suit :

$$y_j^{(5)} = \sum_{i=1}^{16} \bar{\omega}_i f_i \quad (3.13)$$

L'apprentissage du système ANFIS est effectué en utilisant un ensemble des données d'entrée et de sortie. Pour réduire l'erreur dans la phase d'apprentissage, au cours du processus de modélisation, un algorithme hybride combinant la méthode de la descente du gradient et la méthode des moindres carrés sont utilisés pour ajuster les paramètres linéaires et non linéaires du système ANFIS. Les paramètres conséquents $(c_1^j, c_2^j, c_3^j, c_4^j, c_5^j)$ sont optimisés à l'aide de la méthode des moindres carrés, tandis que les paramètres prémisses (a_i, b_i, c_i) sont mis à jour via la méthode de la retropropagation du gradient de l'erreur.

3.3 Hypothèses de travail

La méthodologie est basée sur la prédiction de la tension d'une PEMFC au cours de fonctionnement en conditions nominales. En effet, quelle que soit la dégradation envisagée, la tension de la pile reste l'indicateur le plus simple et le plus direct du SOH du stack. Toutefois, la tension du stack a tendance à diminuer significativement avec le temps et le mode d'utilisation ; en utilisant les mesures de tension en tant qu'entrées du modèle de prédiction, le résultat de prédiction sera une tension de valeur constante, tandis que sa dérivée présente un éloignement progressif de sa valeur nominale. Nous proposons de considérer ici la dérivée de la tension du stack, car elle présente une évolution lente et continue dans le temps, celle-ci peut être considérée comme une série temporelle pour fournir des prédictions précises. Si cette variation peut être prédite en utilisant la méthodologie proposée, c'est-à-dire, si on connaît la valeur de la dérivée de la tension, la tension du stack peut être reconstruite à l'aide d'un intégrateur. En autres termes, en prenant comme entrée les données obtenues à partir du pré-traitement du signal, nous utilisons le modèle ANFIS pour prédire la dégradation de la tension du stack.

Dans le modèle de prédiction développé, nous analysons les variations temporelles de la tension, provoquées par des effets de dégradation sur deux stacks PEMFC fonctionnant jusqu'à 1 000 heures (24/7) à des conditions opératoires nominales. Le modèle de prédiction est construit sur la base des hypothèses suivantes : (i) les dégradations issues du processus de vieillissement sont irréversibles ; (ii) le stack est utilisé sur un profil de courant constant et dans des conditions environnementales stables ; (iii) les paramètres électriques, thermiques et fluidiques sont parfaitement contrôlés : la sollicitation est réalisée au point de fonctionnement nominal.

3.4 Acquisition des données de la PEMFC

Les données sont issues d'un essai longue durée réalisé sur deux stacks PEMFC, chacun composé de cinq cellules et avec une surface active de 220 cm². Les stacks PEMFC sont évalués selon différents scénarios : sous des conditions opératoires autour du point de fonctionnement nominal et sur une période de 1 000 heures. Le premier stack fonctionne à un courant constant de 110 A, une température de 75 °C, une pression absolue de 1 500 mbar et des facteurs de stœchiométrie anodique équivalent à 1.5 et cathodique égal à 2. Le deuxième stack est utilisé dans des conditions similaires mais en incorporant une perturbation périodique dans le courant : un signal triangulaire de $f = 5$ kHz avec une amplitude crête à crête de $\Delta I = 20$ % de la valeur du courant nominal. Ce type de stress est plus proche des conditions expérimentales générées en connectant la PEMFC à un convertisseur statique DC/DC. Le lecteur pourra se référer à [139] pour une description détaillée du dispositif expérimental mis en place. Les tensions des deux stacks, qui seront vues comme signaux de référence sont illustrées dans la Figure 3.2 et la Figure 3.3.

3.5 Techniques pour le pré-traitement du signal original

Expérimentalement, la tension du stack est mesurée avec une fréquence d'échantillonnage égale à 1 Hz ; néanmoins, la phase d'apprentissage du modèle de prédiction est effectuée en utilisant les observations relevées à intervalles réguliers d'une heure. L'échantillonnage a été défini dans le but de réduire le temps d'estimation, en réduisant le nombre d'itérations nécessaires

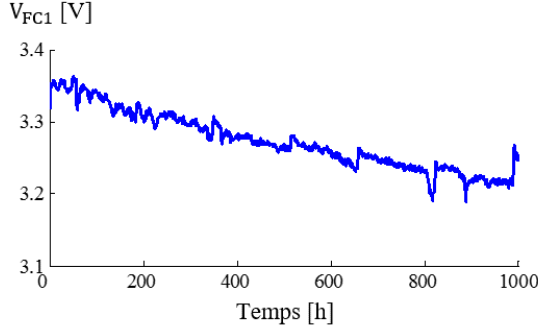


Figure 3.2 – Tension du stack 1

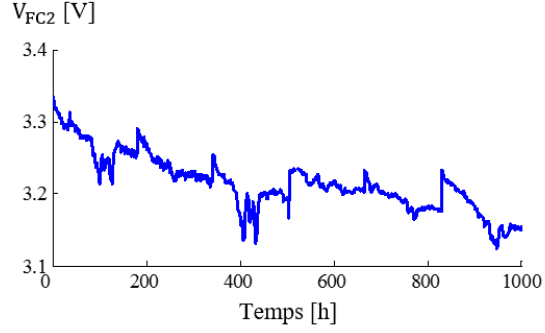


Figure 3.3 – Tension du stack 2

pour répondre aux critères de convergence et, par conséquent, pour obtenir une réduction du coût de calcul. Compte tenu du fait que la vitesse de dégradation dans une PEMFC est faible (typiquement de l'ordre de quelques $\mu\text{V}/\text{cellule}/\text{heure}$), l'ensemble d'observations soustraites est suffisamment petit pour maintenir une information représentative des données de référence.

3.5.1 Décomposition du signal original en deux composantes

L'un des principaux défis que pose la tension du stack vue comme signal d'entrée, est que des changements brusques ne peuvent pas être prédits. Pour faire face à ce défi, nous proposons une méthode qui permet de réduire l'erreur dans les prédictions provoquée par des perturbations externes dans la tension du stack (i.e. le processus de démarrage/arrêt, la variation dans les conditions de fonctionnement, le relevé des mesures de courbes de polarisation ou des spectres d'impédance qui sont expérimentalement effectuées au fil du temps pour estimer le SOH de la PEMFC). Nous considérons comme hypothèse que le taux de variation de la tension ($\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$) au cours de fonctionnement nominal (et donc lié strictement au vieillissement du stack) reste entre des limites prédéfinies. Ainsi les perturbations peuvent être identifiées pour ensuite ne pas être considérées dans la phase d'apprentissage du modèle de prédiction.

Nous proposons de diviser le signal de tension en deux composantes : une composante due à la tension en fonctionnement nominal, et une composante due aux perturbations externes. Cette méthodologie permet de relever une tendance qui facilite la projection des données dans le futur, et lisser à la fois les variations aléatoires à l'aide d'une fenêtre glissante de la taille des données d'entrée et deux paramètres. Les paramètres servant à diviser le signal sont la moyenne

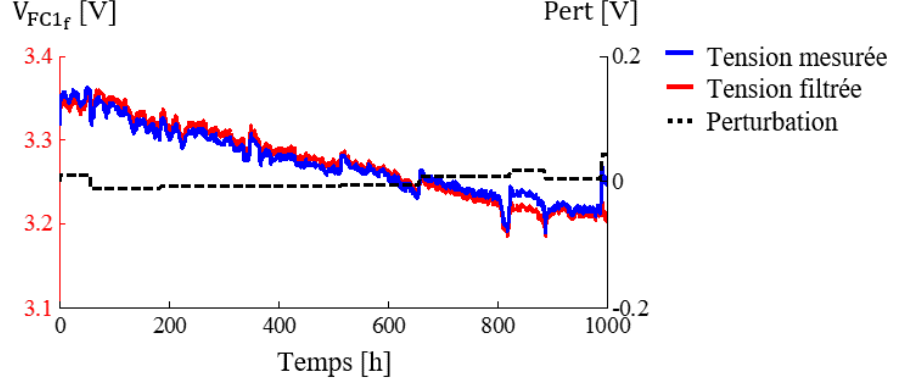


Figure 3.4 – Décomposition du signal de référence en deux composants, V_{FC1}

arithmétique (AM – Arithmetic Mean) et l'écart type (σ) de la variation de la tension entre les mesures de tension successives. Si la variation de deux mesures successives est supérieure à la $AM \pm 3\sigma$, elle est donc considérée comme une perturbation externe (ici comme hypothèse de simplification on assume que une distribution normale dont 99.7 % des valeurs se situent à l'intérieur de trois écarts-types de la moyenne). La tension du stack est divisée comme l'indique la Figure 3.4. La phase d'apprentissage dans le modèle de prédiction est effectuée en utilisant la tension en fonctionnement nominal.

3.6 Description du modèle de prédiction

Sur la base des points mentionnés ci-dessus, les vecteurs construits à partir de la variation temporelle de la tension du stack, seront considérés comme étant des données originales sous la forme d'une série temporelle et seront inclus dans le modèle de pronostic. La méthodologie proposée comprend les étapes suivantes : définition des entrées et sorties du système, organisation des données, apprentissage et prédiction, et finalement évaluation des performances.

3.6.1 Définition des entrées et sorties du système

L'entrée du modèle de prédiction est un ensemble de N valeurs contenant la valeur actuelle et $N - 1$ régresseurs (valeurs aux instants précédents) de la série temporelle représentée par $y(t)$. L'écart de temps entre ces points défini par α détermine l'espacement des $N - 1$ régresseurs. La sortie du modèle de prédiction est un singleton représentant la valeur de la série

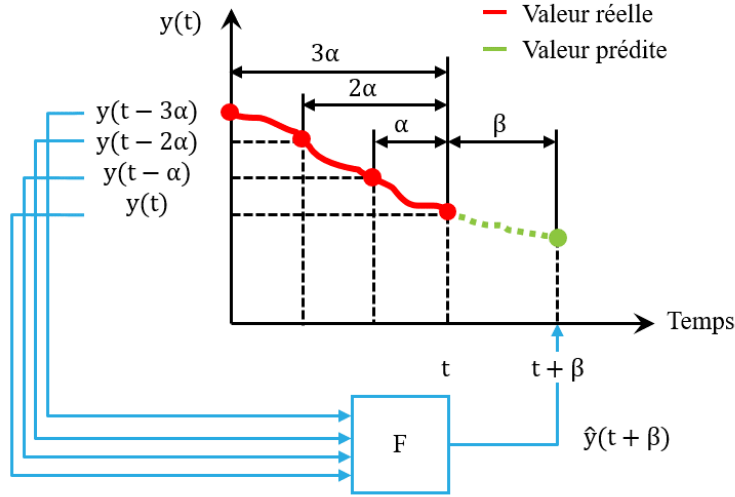


Figure 3.5 – Structure des entrées/sortie classique, avec 3 régresseurs, $N=4$

chronologique dans un futur proche défini par l'écart de temps représenté par β . La relation entre les entrées et la sortie est définie par l'Équation (3.14), où la notation $\hat{y}(t)$ est retenue pour les valeurs prédites. La Figure 3.5 illustre, à manière d'exemple, la relation entre l'entrée et la sortie (4 entrées/1 sortie) et le modèle de prédiction représenté par F .

$$\hat{y}(t + \beta) = F[y(t - (N - 1)\alpha), \dots, y(t - 2\alpha), y(t - \alpha), y(t)] \quad (3.14)$$

3.6.2 Organisation des données

Les données disponibles consistent en un ensemble d'observations divisées en deux groupes : un pour l'apprentissage et l'autre pour l'évaluation. L'ensemble des données pour l'apprentissage est organisé sous la forme de l'Équation (3.14). Le Tableau 3.1 montre comment les données sont organisées, dans cet exemple, le signal est échantillonné à partir de $t = 0$ à $t = m$ avec une fréquence de 1 Hz. Nous pouvons constater que le nombre d'ensemble des données utilisés pour former le modèle de prédiction est inférieur au nombre total des valeurs observées.

Si raw_{data} représente la quantité de ces valeurs observées, la quantité de données exploitables pour former l'ensemble des données d'apprentissage (trn_{data}) du modèle de prédiction est définie par l'Équation (3.15).

$$\text{trn}_{\text{data}} = \text{raw}_{\text{data}} - (N - 1)\alpha - \beta \quad (3.15)$$

Tableau 3.1 – Organisation des données pour l'étape d'apprentissage

t	$y(t + \beta)$	$y(t)$...	$y(t - N\alpha)$
0	$y(\beta)$	$y(0)$	–	UK
\vdots	–	–	–	–
α	$y(\alpha + \beta)$	$y(\alpha)$	–	UK
\vdots	–	–	–	–
$N\alpha - 1$	$y(N\alpha + \beta - 1)$	$y(N\alpha - 1)$	–	UK
$N\alpha$	$y(N\alpha + \beta)$	$y(N\alpha)$	–	$y(0)$
\vdots	–	–	–	–
$m - \beta - 1$	$y(m)$	$y(m - \beta - 1)$	–	$y(m - \beta - 1 - N\alpha)$
$m - \beta$	UK	$y(m - \beta)$	–	$y(m - \beta - N\alpha)$
\vdots	–	–	–	–
m	UK	$y(m)$	–	$y(m - N\alpha)$

Note : UK signifie valeur inconnue.

3.6.3 Apprentissage et prédiction

La notation F est retenue pour représenter la relation entrée/sortie du modèle de prédiction. L'apprentissage du système s'effectue en utilisant les données observées organisées en ensembles comme décrit dans la Section 3.6.2 et la relation définie dans l'Équation (3.14). Pendant la phase d'apprentissage seules les valeurs observées de $y(t)$ sont considérées. La dernière valeur observée est représentée par y_{m-1} , la première valeur prédite est représentée par y_m . L'horizon de prédiction noté H détermine la quantité des valeurs à prédire et donc quand l'algorithme devra être arrêté. Pour faire la prédiction à N pas, il est proposé d'utiliser une approche itérative. Cette approche utilise un modèle unique qui est accordé pour effectuer une estimation de la prédiction à un pas "one-step ahead prediction" \hat{y}_{t+1} . Les valeurs estimées sont utilisées comme des variables indépendantes du modèle pour estimer les prochaines sorties dans le temps. L'opération est répétée jusqu'à ce que l'estimation de la valeur du signal atteigne l'horizon de prédiction \hat{y}_{t+H} . Le principal inconvénient de cette approche est la propagation de l'erreur : la précision diminue au fur et à mesure que la longueur de l'horizon de prédiction augmente. Cette procédure itérative est illustrée sur la Figure 3.6.

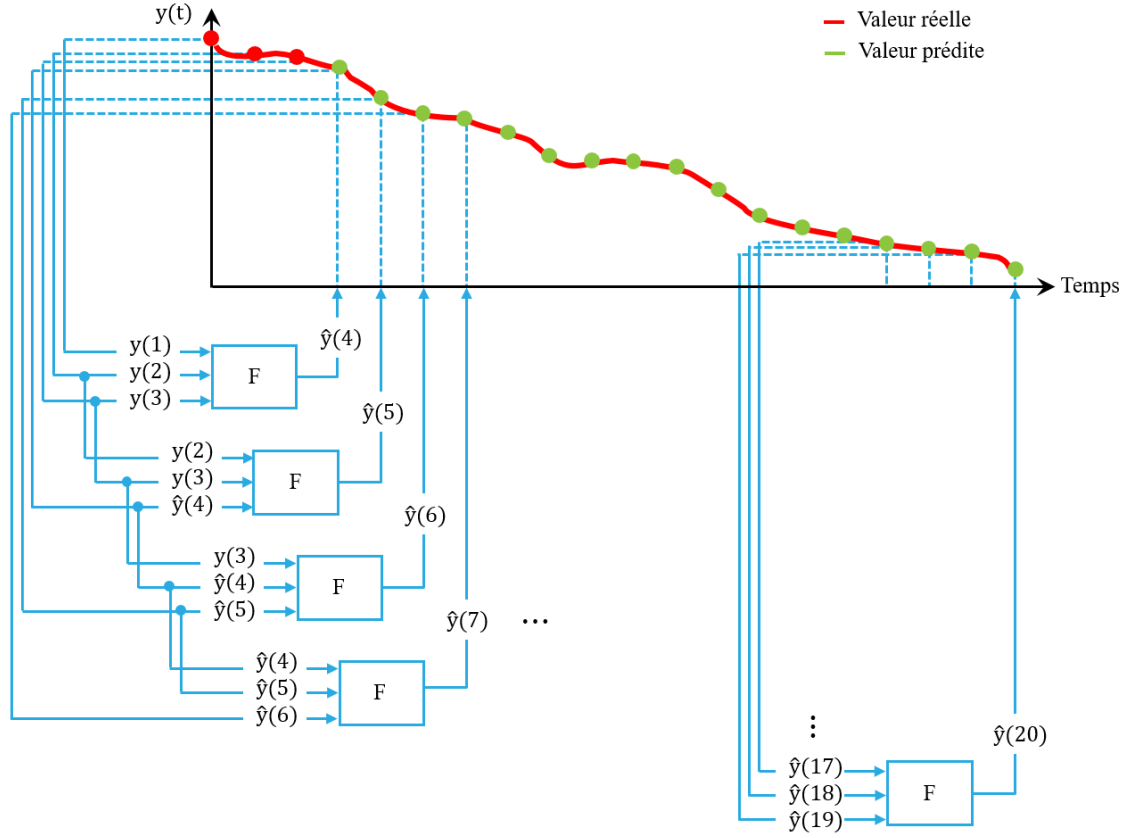


Figure 3.6 – Exemple d’une structure itérative ($N = 3$, $\alpha = \beta = 1$, et $H = 17$)

Après quelques itérations, la nouvelle prédiction utilise des valeurs prédites (non observés). Par conséquent, l’Équation (3.14) prend la forme de l’Équation (3.16) comme suit :

$$\hat{y}(t + \beta) = F [\hat{y}(t - (N - 1)\alpha), \dots, \hat{y}(t - 2\alpha), \hat{y}(t - \alpha), \hat{y}(t)] \quad (3.16)$$

A priori, on peut imaginer qu’une augmentation du nombre d’entrées pourrait améliorer la qualité de la prédiction. Néanmoins, cela implique également une augmentation de la complexité au cours de la phase d’apprentissage du modèle de prédiction et donc une augmentation du temps de calcul. En outre, selon l’Équation (3.15), une augmentation de N implique une diminution de l’ensemble des données exploitables favorisant l’apprentissage du modèle. L’influence de α et β est plus difficile à définir ; il sera démontré que sa sélection dépend de la série temporelle spécifique et qu’il existe une dépendance entre la sélection de α , β et N . Cette question fait l’objet de discussion dans la Section 3.9.1

3.7 Cas d'étude

La méthodologie présentée dans la Section 3.6 est légèrement modifiée. L'Équation (3.14) n'est pas adaptée pour l'apprentissage du modèle de prédiction, elle est alors modifiée comme représenté dans l'Équation (3.17). Comme la tension du stack a tendance à diminuer au cours du temps, la chute de tension est considérée comme une variation positive, et dans cette équation le terme figurant à gauche représente la chute de tension dans le futur β heures, le terme figurant à droite représente la chute de tension dans le passé $(N - 1)\alpha, \dots, \alpha$ heures.

$$\hat{u}(t + \beta) - u(t) = F [u(t) - u(t - (N - 1)\alpha), \dots, u(t) - u(t - \alpha), u(t) - u(t)] \quad (3.17)$$

La Figure 3.7 décrit la structure des entrées/sortie modifiées qui sont utilisées pour prédire la variation de tension du stack et, à laquelle on a appliqué les pré-traitements visant à soustraire les perturbations imprévisibles (cf Section 3.6.1). Dans cet exemple, le système de prédiction utilise quatre entrées ($N = d = 4$).

Les valeurs de la série temporelle sont organisées comme expliqué dans la Section 3.6.2. Ces observations sont divisées en deux ensembles. Le premier ensemble d'observations $[t_0, t_1]$ est utilisé pour la phase d'apprentissage du modèle de prédiction et le deuxième ensemble d'observations $[t_1, t_1 + H]$ est utilisé pour la validation du pronostic.

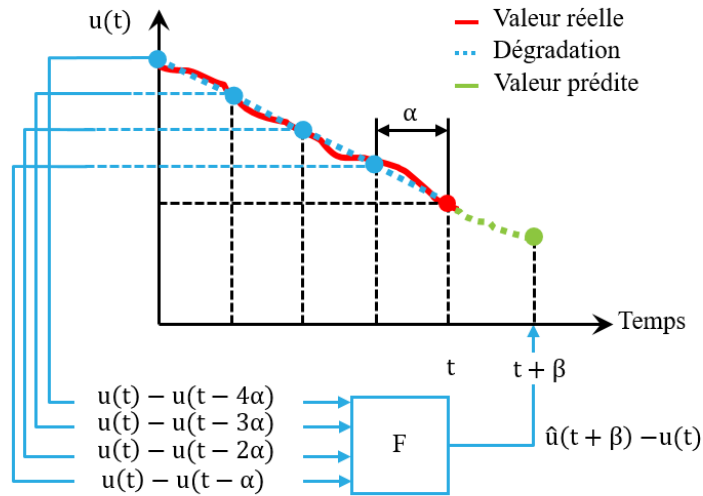


Figure 3.7 – Structure des entrées/sortie modifiée, avec $N=d=4$

Tableau 3.2 – Paramètres du modèle utilisés dans la phase d'apprentissage

Description du modèle	Paramètres de réglage
Nombre d'entrées	$N = 3, 4, 5$
Nombre de sorties	1
Type de fonctions d'appartenance du modèle	Gaussiennes
Nombre de fonctions d'appartenance	$MF \in [2, 10]$
Données d'apprentissage	$\text{trn}_{\text{data}} \in [100, 800]$
Écart de temps entre les valeurs successives	$\alpha \in [1, 20]$

Notre proposition favorise l'utilisation d'une méthode simple, rapide et assez précis, dont la mise en œuvre facilitera l'exploration de plusieurs stratégies pour le pré-traitement, la sélection de variables ainsi que les stratégies de prédiction. L'objectif est de maîtriser l'erreur de prédiction tout en réduisant le temps de calcul, notamment lors de la phase d'apprentissage. Comme nous l'avons dit auparavant, le défi est d'identifier les paramètres du modèle qui prédit avec la plus grande précision possible la série temporelle. Pour ce faire, plusieurs ensembles des paramètres sont considérés pendant la phase d'apprentissage de chaque structure de prédiction. Des simulations sont effectuées en utilisant toutes les combinaisons des paramètres présentés dans le Tableau 3.2.

Note : pour tester le modèle de prédiction, nous avons choisi comme fonction d'appartenance celles dites gaussiennes en raison de leurs capacités de généralisation, car elles transforment les valeurs d'origine en distribution normale. Le centre de la distribution normale détermine les régions des règles floues dans lesquels les sous modèles linéaires sont valides [126, 131, 132, 138].

3.8 Critères d'évaluation de la performance

La qualité de la prédiction est évaluée en précision et en temps de calcul. Le modèle de prédiction devrait donner une bonne solution, et être en mesure d'être mis en œuvre dans des applications temps réel (i.e. lié au temps réellement requis pour traiter un résultat en vue d'une prise de décisions). Cette étape de validation nous permet de calculer l'écart entre la réponse mesurée sur le processus réel et celle déduite du modèle de prédiction. La performance de la

prédiction est quantifiée à l'aide des critères statistiques standards suivants : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE – Root Mean Square Error), l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE – Mean Absolute Percent Error) et le coefficient de détermination (R^2 – Coefficient of determination) comme cela se fait classiquement dans la littérature [140, 141]. Ces critères sont définis par les Équations (3.18), (3.19) et (3.20) respectivement.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (3.18)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{|y_i|} * 100 \quad (3.19)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.20)$$

où \hat{y}_i représente les valeurs prédites, y_i les valeurs observées, \bar{y} la moyenne de l'ensemble observé et m est le nombre de valeurs observées.

RMSE et MAPE sont des nombres positifs, une prédiction est considérée comme parfaite quand les valeurs de RMSE et MAPE sont égales à zéro. R^2 est un nombre positif compris entre zéro et un. Une valeur de R^2 proche de 1 indique un bon ajustement du modèle de prédiction, tandis qu'une valeur proche de zéro représente un mauvais ajustement [140]. À noter que si deux ensembles de paramètres fournissent la même ou presque la même précision dans la prédiction, le plus rapide pourrait être le mieux adapté pour effectuer la mise en œuvre de la méthodologie en temps réel.

3.9 Résultats de simulation et discussion

La Figure 3.8 et la Figure 3.9 présentent les meilleures prédictions obtenues avec l'ensemble de paramètres $N = 4$, $MF = 3$, $\alpha = 3$ pour V_{FC1} et $N = 4$, $MF = 19$, $\alpha = 2$ pour V_{FC1_f} ; et $N = 4$, $MF = 4$, $\alpha = 3$ et $N=3$, $MF=6$, $\alpha = 4$ pour V_{FC2} et V_{FC2_f} respectivement. Pendant la phase d'apprentissage, la quantité de données utilisées est de $t_0 = 0$ heures à $t_1 = 500$ heures sur un horizon de prédiction égal à $H = 500$ heures. Sauf pour le deuxième stack où la quantité de données utilisées correspond à l'intervalle de $t_0 = 0$ heures à $t_1 = 600$ heures.

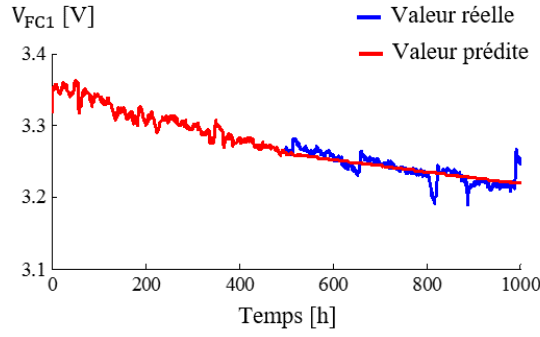
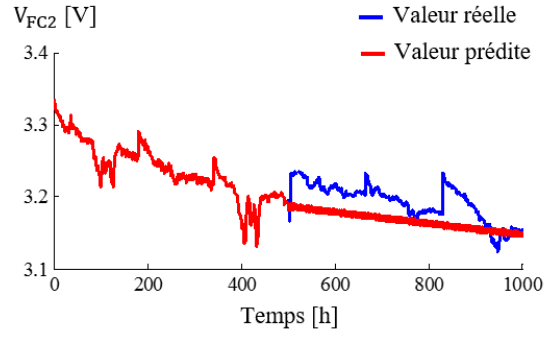
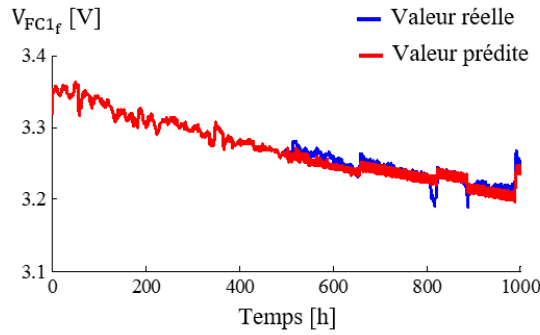
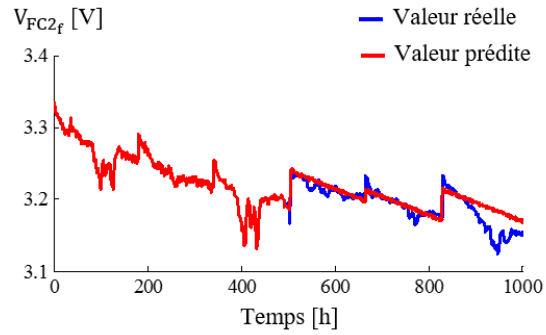
(a) V_{FC1} (a) V_{FC2} (b) V_{FC1_f} (b) V_{FC2_f}

Figure 3.8 – Prédiction tension du stack 1

Figure 3.9 – Prédiction tension du stack 2

Le Tableau 3.3 et le Tableau 3.4 regroupent l'ensemble des paramètres qui donnent les meilleurs résultats de prédiction des signaux.

Les résultats de simulation obtenus révèlent que le modèle de prédiction basée sur ANFIS donne de bons résultats en poursuite de trajectoire, pour la prédiction des séries temporelles, et particulièrement, pour prédire la perte des performances causées par la dégradation des PEM-FCS. La précision dans la prédiction de la tension du stack est beaucoup plus faible dans le cas où nous n'avons pas appliqué le pré-traitement. Cependant, comme illustré sur la Figure 3.8(a) et la Figure 3.9(a) la prédiction de la tension du stack 1 et 2 suit la tendance du signal de référence. De la même manière, nous pouvons observer que les performances de prédiction sont fortement améliorées lorsque le signal de tension est divisé en deux composants. En outre, avec ce procédé une bonne qualité dans la prédiction est obtenue en utilisant moins de données d'apprentissage.

Tableau 3.3 – Récapitulatif des meilleurs résultats pour la prédiction de la tension du stack 1

Stack 1	N	α	MF	trn _{data}	Erreur de prédiction			Temps de calcul : $\frac{CT}{CT}$ s
					RMSE	MAPE	R ²	
								CT _{V_{FC1}} = 10.95
								CT _{V_{FC1f}} = 0.45
V _{FC1}	4	3	3	500	0.0123	0.2810	0.5335	1
	4	4	3	500	0.0140	0.3197	0.3946	1.0283
	4	1	4	500	0.0116	0.2641	0.5865	18.7146
	3	1	6	400	0.0137	0.3298	0.5608	4.9593
	5	2	3	500	0.0120	0.2782	0.5559	27.1084
V _{FC1f}	4	19	2	500	0.0081	0.1841	0.9258	1
	3	17	3	500	0.0098	0.2374	0.8919	2.1115
	4	3	3	500	0.0101	0.2353	0.8880	28.1467
	4	4	3	500	0.0101	0.2489	0.8874	26.2410

Tableau 3.4 – Récapitulatif des meilleurs résultats pour la prédiction de la tension du stack 2

Stack 2	N	α	MF	trn _{data}	Erreur de prédiction			Temps de calcul : $\frac{CT}{CT}$ s
					RMSE	MAPE	R ²	
								CT _{V_{FC2}} = 12.94
								CT _{V_{FC2_f}} = 4.43
V _{FC2}	4	4	3	600	0.0165	0.3709	0.5466	1
	4	4	2	600	0.0167	0.3778	0.5337	0.0513
	3	6	3	600	0.0168	0.3780	0.5278	0.0854
	3	8	5	600	0.0168	0.3793	0.5255	1.5812
	4	8	2	600	0.0168	0.3834	0.5233	0.0478
V _{FC2_f}	3	6	4	500	0.0128	0.3055	0.9242	1
	4	3	2	500	0.0134	0.3165	0.9177	0.0849
	3	6	3	500	0.0135	0.3230	0.9162	0.2058
	3	3	3	600	0.0131	0.3342	0.9029	0.2422

Note : le temps de calcul, exprimé en secondes, est relatif aux caractéristiques propres liées au processeur du PC utilisé : Processeur : Intel®Core™i5-2500 CPU @ 3.30 GHz Mémoire installée (RAM) : 16 Go Type du système : Système d'exploitation 64 bits

3.9.1 Analyse de sensibilité paramétrique

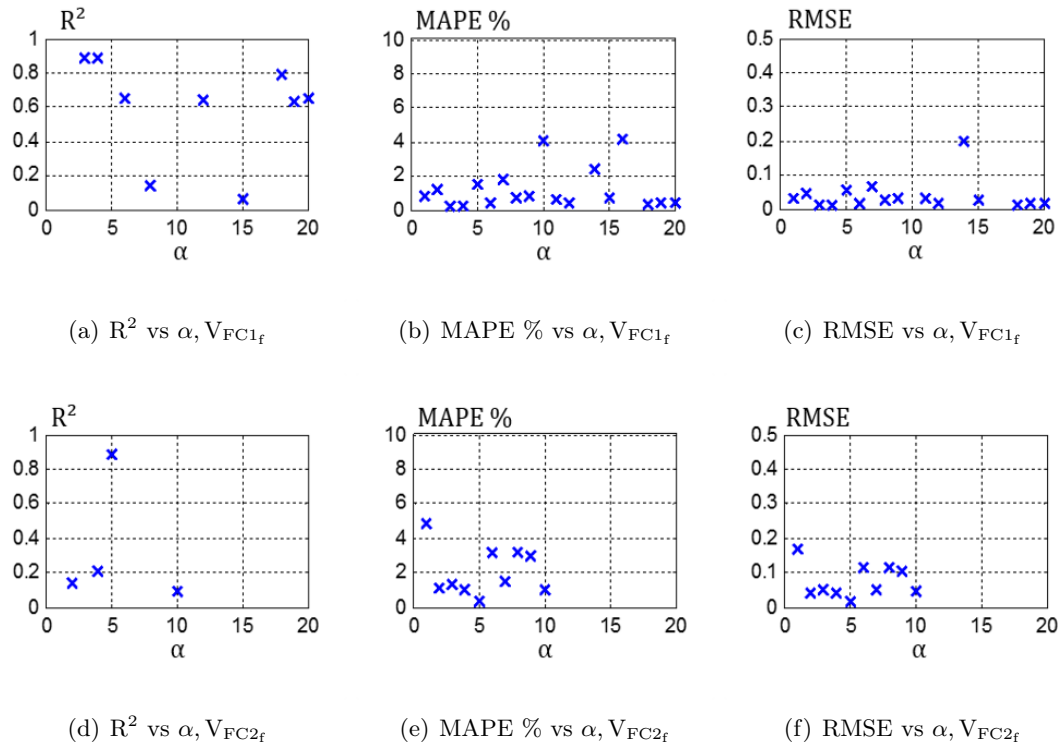
L'approche de pronostic proposé dans ce chapitre nous a permis de prédire l'état futur du système sur des horizons de temps donnés. Néanmoins, la sélection du nombre et de la valeur appropriée pour l'initialisation des paramètres et l'apprentissage du modèle a une influence sur le temps de calcul et l'exactitude du processus de prédiction. En effet, lorsque le modèle possède un nombre de paramètres trop élevé, le temps de simulation risque d'être très long, ce qui entraînera des difficultés pour réaliser le pronostic en temps réel. Si le modèle est trop simplifié, sa précision décroît. Les résultats risquent alors d'être décevants, ce qui remet en question l'interprétation physique.

Dans ce contexte, nous avons étudié l'influence des paramètres critiques de l'algorithme afin de maîtriser l'erreur de prédiction, de systématiser et d'améliorer l'applicabilité des outils de pronostic quel que soit l'horizon de prédiction. Il s'agit donc de réduire l'influence des choix humains arbitraires, de réduire les temps nécessaires au paramétrage et/ou à l'apprentissage.

■ Sélection des paramètres

Suite aux résultats obtenus dans la Section précédente, nous pouvons considérer que pour effectuer la prédiction d'une série temporelle, des résultats précis seront trouvés pour l'apprentissage du modèle ANFIS en utilisant $N = 4$ et $MF = 3$. Nous avons observé que le nombre d'entrées le plus adéquat lors du choix des paramètres du modèle de prédiction doit être petit, $N = 4$ ou $N = 5$, et qu'augmenter ce nombre n'augmente pas la qualité de la prédiction ni la performance du réseau ANFIS. À ce stade, il est difficile de conclure sur la sélection de α . Il est donc nécessaire de recourir à une évaluation complémentaire de ce paramètre. En raison de l'absence de connaissances sur la valeur de la constante de temps du signal, et dans le but de garantir la meilleure sélection de la valeur de α , l'apprentissage du modèle ANFIS s'effectue en envisageant de multiples valeurs de α . Nous utilisons des nouveaux modèles ANFIS avec des valeurs fixes de $N = 4$ et $MF = 3$, tandis que la valeur de α varie de 1 jusqu'à 20. Les résultats de l'erreur (R^2 , MAPE et RMSE) en fonction de α à l'aide des premières 500 heures pour l'apprentissage du système sont présentés dans la Figure 3.10.

Comme nous pouvons le constater, les valeurs de $\alpha = 4$ et $\alpha = 3$ heures représentent pour la tension filtrée du stack 1, et $\alpha = 5$ et $\alpha = 4$ heures pour la tension filtrée du stack 2, les

Figure 3.10 – Prédiction de performances vs α , $N = 4$, $MF = 3$

meilleures performances dans la prédiction. Les prédictions obtenues par l'apprentissage de différents modèles ANFIS avec d'autres valeurs de α présentent dans certains cas des erreurs très élevées, les axes sont ainsi limités afin de présenter uniquement les valeurs des erreurs raisonnables. En conclusion, il convient de noter que le modèle de prédiction basé sur ANFIS est approprié pour la prédiction des séries temporelles. Les résultats obtenus avec quatre entrées et trois MFs semblent être le meilleur compromis entre la qualité de la solution et le temps de calcul, au moins pour la série considérée. Comme nous l'avons vu précédemment, le temps de calcul utilisé pendant la phase d'apprentissage dépend du nombre de règles floues, l'augmentation de N et MF entraînera à son tour une augmentation du temps de calcul. Cependant, ceci n'assure pas nécessairement une meilleure qualité dans la prédiction. Théoriquement, une grande quantité de variables d'entrée offre plus d'information sur le comportement du système, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis, mais sous peine d'une augmentation de la complexité du modèle et du temps de calcul. Dans la pratique, la sélection de moins de variables d'entrée conduit à une utilisation plus efficace du modèle, à une interprétation plus facile de

l'ensemble choisi et à un temps de calcul plus petit.

D'autre part, si la quantité de données disponible pour la phase d'apprentissage est limitée, il faut tenir en compte que la valeur correspondante de α doit être sensiblement inférieure à la dimension de la fenêtre de temps, c'est à dire, à la dimension des vecteurs d'entrée du modèle. La meilleure valeur de α dépend fortement de la constante de temps de la série temporelle.

■ Horizon de prédiction

L'horizon de prédiction H peut être adapté à court, moyen ou long-terme. Toutefois, ce choix dépend de la quantité et de la qualité des données d'apprentissage. Les modèles ANFIS sont formés à l'aide de différents ensembles de données afin d'évaluer la quantité d'observations nécessaire pendant la phase d'apprentissage.

La Figure 3.11 et la Figure 3.12 illustrent l'évolution de l'erreur (R^2 , MAPE et RMSE) en fonction de l'horizon de prédiction et de la quantité des données utilisées pendant la phase d'apprentissage du modèle ANFIS. Dans cet exemple, l'horizon de prédiction est imposé selon le nombre de données (100, 250 et 500 heures). Comme prévu, la qualité de la prédiction augmente au fur et à mesure que la quantité de données augmente. Nous observons que l'apprentissage du modèle ANFIS effectué en utilisant $t_1 = 100$ heures ou $t_1 = 250$ heures ne permettent pas d'obtenir une bonne qualité dans la prédiction si aucun pré-traitement des données n'est effectué. Par contre, nous pouvons observer que les résultats sont plus précis quand le modèle de prédiction est formé avec les données provenant d'un période plus longue ($t_1 = 500$ heures). Dans le cas où la tension du stack est filtrée, les résultats obtenus commencent à être relativement satisfaisants dès 250 heures d'apprentissage, le pré-traitement des données expérimentales permettant de réduire les contraintes liées à la phase d'apprentissage. Par ailleurs, on peut noter que la méthode ANFIS semble être plus appropriée pour les prédictions à long-terme, cependant les prédictions en vue d'un horizon à long-terme ne seront possibles qu'en utilisant un nombre élevé de données d'apprentissage.

3.10 Conclusion

Compte tenu de la complexité des PEM-FCS, ce chapitre a porté sur la proposition d'une architecture de PHM basé sur une approche guidée par les données. Les méthodes envisagées

ont été concentrées sur les trois premières étapes de la méthodologie PHM. Les résultats présentés montrent que l'approche est efficace et simple à mettre en œuvre.

Le signal de tension a été divisé en deux composantes : les observations issues du comportement en fonctionnement nominal et les observations issues du comportement provoqué par des perturbations externes. Cette pré-traitement a permis de réduire l'erreur dans les prédictions causées par des perturbations (i.e. la prédiction de la tension du stack lors du démarrage). Une fois le signal pré-traité, nous avons introduit les systèmes ANFIS comme modèle de prédiction. La méthodologie utilisée se base sur la prédiction des séries temporelles, l'architecture et la sélection des paramètres du modèle s'effectue en prenant en compte, non seulement l'exactitude du système, mais aussi sa capacité à être mis en œuvre sur une approche en temps réel. La méthodologie a été évaluée en utilisant des données issues d'un essai longue durée de 1 000 heures sur deux stacks PEMFC. Les résultats de simulation révèlent que le modèle ANFIS est bien adapté pour la prédiction des séries temporelles et plus particulièrement pour la prédiction de la diminution des performances causée par la dégradation du PEM-FCS. La méthodologie basée sur ANFIS qui fournit une excellente alternative pour le PHM des systèmes complexes et non-linéaires tels que les PEM-FCS. Plus précisément, une telle approche ne nécessite pas une modélisation physique qui peut s'avérer complexe et peut donc être mise en œuvre facilement. Néanmoins, dans les systèmes ANFIS, la complexité pendant la phase d'apprentissage est directement dépendante de la quantité et de la qualité des données expérimentales, du nombre et choix des paramètres considérés. Une approche performante combine un coût de calcul très faible tout en gardant un rendement concurrentiel en termes de vitesse de convergence, de précision et de caractéristiques souhaitables pour l'utilisation en ligne.

Il est à noter que la tension du stack permet d'estimer la dégradation, mais non l'identification des modes de défaillance se présentant dans le système. Pour cette raison et considérant la poursuite de la recherche, il pourrait être intéressant d'intégrer de nouveaux paramètres au processus PHM, prenant par exemple en compte la variation des conditions de fonctionnement (tels que les cycles de marche/arrêt, les variations de charge dynamique) et les variations des conditions environnementales subies par la pile à combustible considérée. De même, les informations contenues dans les spectres d'impédance ou la courbe de polarisation pourraient également s'avérer particulièrement intéressantes pour améliorer les résultats obtenus.

De manière générale, ce chapitre a développé la contribution méthodologique de la thèse sur le PHM des PEM-FCS, c'est-à-dire de l'approche "logicielle" pour l'amélioration, ou tout au moins la maîtrise, de leur durée de vie. En complément aux méthodes PHM, l'hybridation permet d'optimiser le dimensionnement de la PEMFC, protéger le cœur de pile contre les variations rapides de charge, compenser les limitations dynamiques des auxiliaires de la PEMFC. Comme nous le verrons dans le quatrième chapitre, l'hybridation passive peut répondre aux attentes de haute performance et fiabilité dans des conditions de fonctionnement sévères tout en réduisant la consommation du combustible et à un coût compétitif.

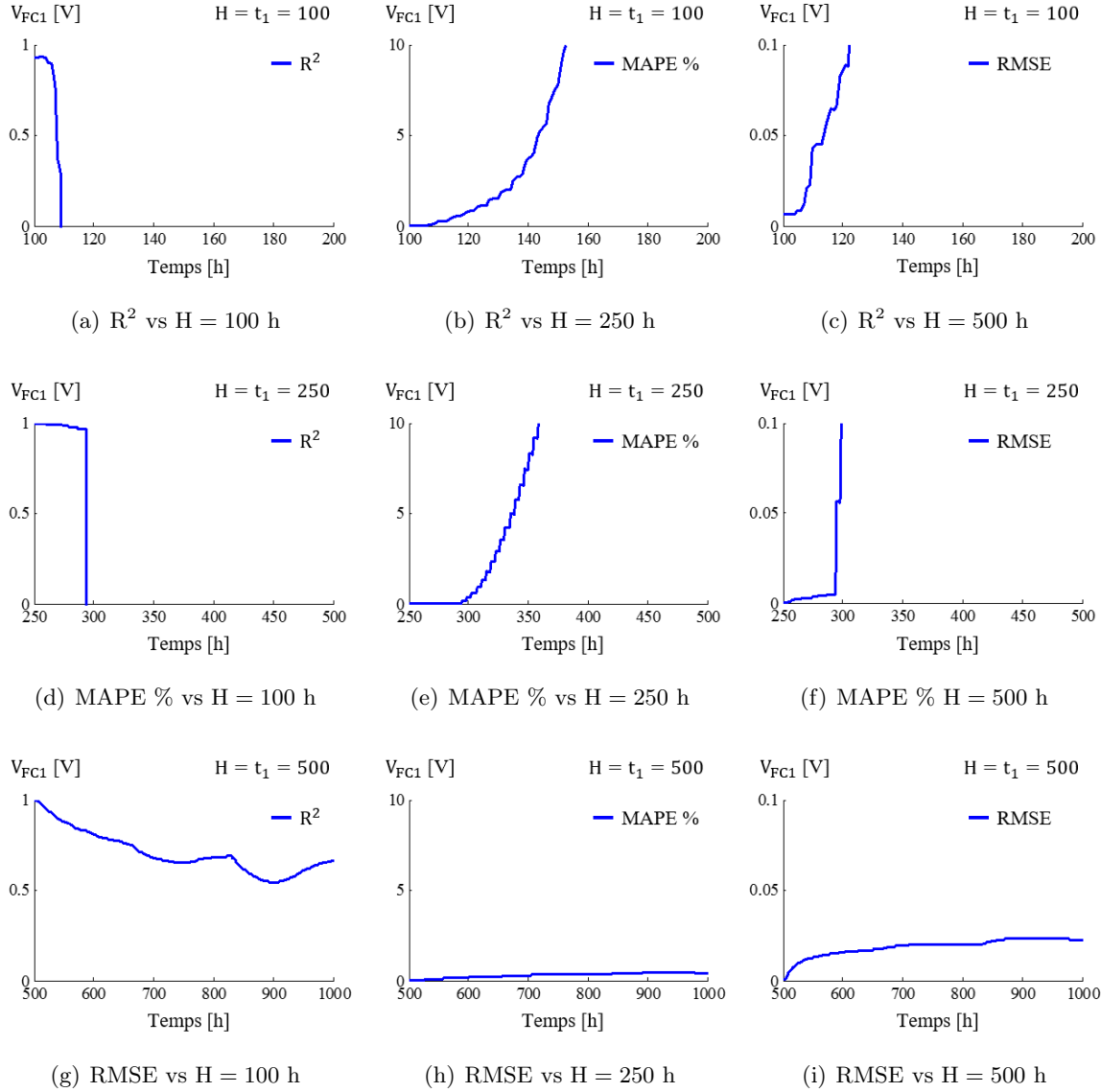
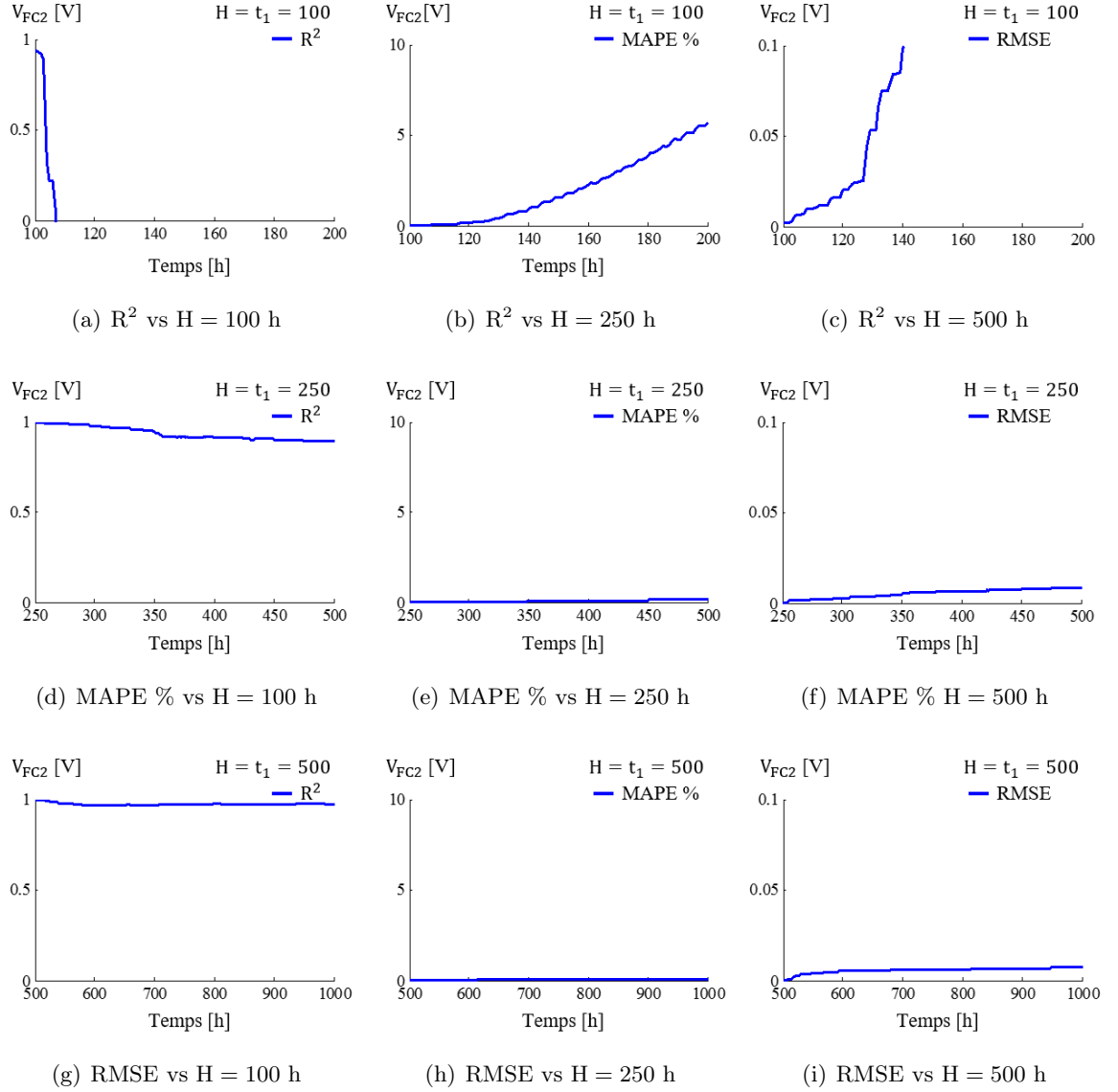


Figure 3.11 – Erreur en fonction de H V_{FC1}

Figure 3.12 – Erreur en fonction de H V_{FC1_f}

Chapitre 4

Augmentation de la durée de vie des PEM-FCS en utilisant une approche matérielle : hybridation directe

Le deuxième chapitre nous a permis de mettre en évidence la problématique de l'électronique de puissance comme étant le maillon faible des systèmes pile à combustible (FCS – Fuel Cell System). Dans ce chapitre, l'augmentation de la durée de vie du FCS est abordée en se focalisant sur deux aspects importants. Tout d'abord, il vise à décrire l'hybridation passive d'une pile à combustible (FC – Fuel Cell) de type à “membrane échangeuse de protons” (PEM – Proton Exchange Membrane) avec des super-condensateurs (UC – Ultra Capacitor). Ici, nous évaluons si le système peut-être fonctionnel sans électronique de puissance d'interconnexion. Plus précisément, nous analysons le comportement électrique de la source hybride (PEMFC/UC) lorsque ces éléments sont directement interconnectés et la gestion “naturelle” d'énergie quand une charge est connectée.

D'autre part, ce chapitre se concentre aussi sur l'analyse des phénomènes électriques, thermiques et fluidiques produits par un court-circuit direct imposé sur la PEMFC (ce qui représente le cas d'une connexion directe d'un UC déchargé à la PEMFC, mais aussi le cas d'une défaillance sur le convertisseur de puissance avec un mode de défaillance de type “semi-conducteur fermé”). En effet, dans le cas d'une défaillance de l'électronique de puissance ou

dans celui de la connexion directe de la PEMFC avec un ensemble d'UCs déchargé, les conditions opératoires sont sensiblement similaires, tout au moins au moment du pic de courant produit lors de la défaillance ou de la connexion directe de la PEMFC sur des UCs déchargés.

Deux contributions relatives à l'hybridation passive des PEMFC/UC sont apportées dans ce chapitre : (i) nous décrivons sur la base de simulations le comportement de la source hybride. Les résultats montrent que la valeur du courant transitoire fournie par la PEMFC servant à recharger les UCs peut atteindre une valeur très supérieure à sa valeur nominale ; (ii) un montage expérimental est conçu et construit afin d'étudier l'effet dû aux courants élevés dans un stack de type PEMFC. Dans le but de comprendre les phénomènes physiques qui se produisent après un court-circuit direct imposé sur le stack, une analyse sur le comportement électrique, thermique et fluide est proposée. En outre, nous présentons les résultats obtenus en utilisant la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS – Electrochemical Impedance Spectroscopy), une méthode qui est largement utilisée pour étudier la dégradation d'une FC. Aucune étude détaillée n'a, à notre connaissance, été signalée pour la compréhension des mécanismes de dégradation de la pile dans ce mode d'opération. La valeur de courant de court-circuit imposé à un stack de type PEM est à notre connaissance la première expérimentation réalisée avec un tel niveau de densité de courant.

4.1 Mise en contexte

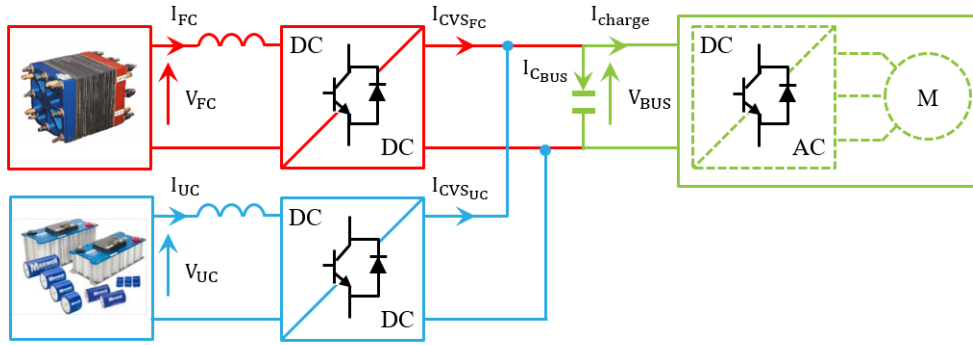
La PEMFC en combinaison avec des UCs est considérée comme une alternative pour améliorer l'efficacité énergétique, l'autonomie et la réponse dynamique des applications légères telles que la traction d'un véhicule [38, 71, 142]. En effet, les PEM-FCS sont considérés comme des convertisseurs d'énergie intéressants en raison de leur efficacité théorique supérieure à celle des moteurs à combustion interne, en particulier à très faible charge, de leur haute densité d'énergie et de leurs faibles émissions (polluantes et sonores). Cependant, leur réponse dynamique électrique est limitée par la dynamique de l'alimentation en gaz. De plus, les piles à combustible n'étant pas réversibles en courant, elles ne sont pas capables de récupérer l'énergie de freinage dans des applications automobiles [26, 143–146]. Il faut donc nécessairement les hybrider avec des éléments de stockage d'énergie électrique dans de telles applications. Les

UCs apparaissent comme une source complémentaire aux piles à combustible en raison de leur forte densité de puissance, de leur capacité de charge/décharge rapide, de leur réversibilité et de leur grande durée de vie [26, 145, 147, 148]. Cependant, il faut noter que les UCs ne peuvent pas être utilisés en tant que seule source d'énergie à bord d'un véhicule en raison d'une énergie spécifique limitée. L'hybridation améliore les caractéristiques de la PEMFC en termes de puissance spécifique et celles des UCs en termes de densité énergétique : elle élargit donc leur gamme de fonctionnement. Étant donné les contraintes imposées par la PEMFC : une source basse tension – fort courant, une tolérance faible sur l'ondulation du courant débité et une dynamique lente lors de régimes transitoires ; l'hybridation est aussi un moyen de réduire les sollicitations dynamiques (changements de charge rapide et opérations de fonctionnement variable) sur la pile elle-même et donc de pouvoir en améliorer la durée de vie.

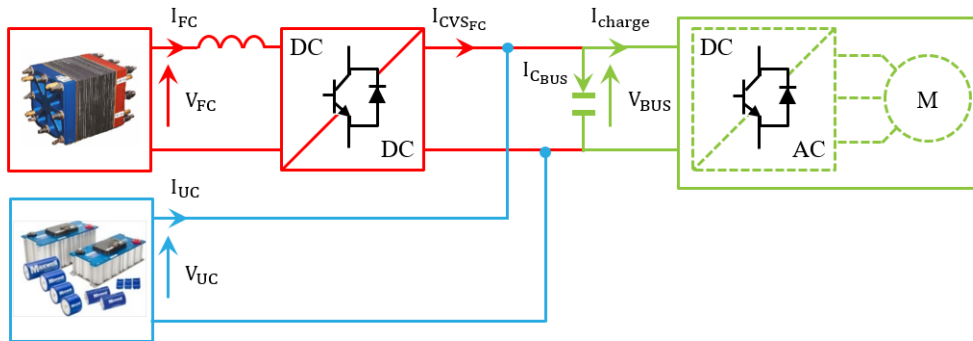
Dans les véhicules à pile à combustible (FC-HEV – Fuel Cell Hybrid Electrical Vehicles), l'association entre une PEMFC et des UCs peut être réalisée en utilisant un système hybride de type actif ou passif. Le comportement global du système dépend à la fois du choix de l'architecture, du dimensionnement et du positionnement de ces éléments en lien avec la charge électrique.

L'architecture active a besoin au moins d'un convertisseur DC/DC pour effectuer la gestion de l'énergie [26–29]. L'adjonction d'un convertisseur DC/DC entre la PEMFC et les UCs permet d'avoir une puissance accrue sur une grande plage de vitesse. Dans cette configuration la tension aux bornes de la PEMFC et des UCs peuvent avoir des valeurs différentes, ce qui offre beaucoup de liberté lors de la conception de la PEMFC et pour la gestion d'énergie entre les sources hybrides ; la tension de la source d'alimentation principale peut être maintenue relativement constante, avec une variation inférieure à celle de la source de stockage ; l'efficacité du système hybride actif peut être améliorée car la PEMFC fonctionne avec des pertes inférieures à des courants plus faibles [30]. Cependant, un convertisseur de puissance est généralement une source de défaillances importante, en outre sa présence augmente généralement les pertes énergétiques, le volume, le poids et le coût de la source hybride, ces quatre éléments sont clés et influencent fortement la conception du convertisseur [28, 148]. La problématique liée au choix des convertisseurs de puissance pour les FC-HEV conduit à réfléchir à l'optimisation de la répartition d'énergie embarquée des sources et de tous les récepteurs du véhicule [149].

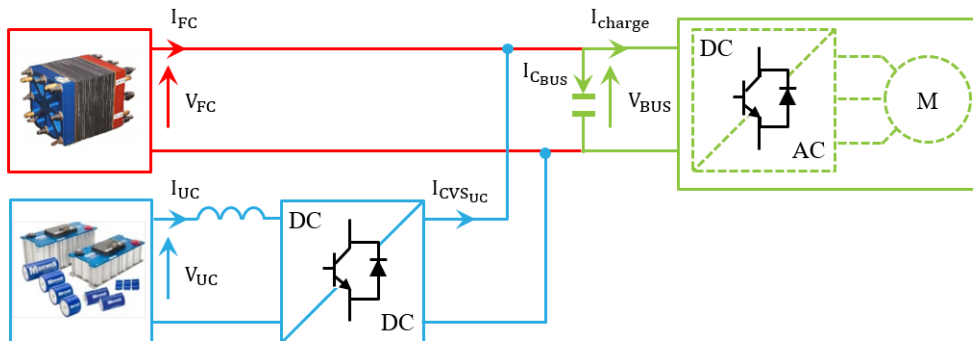
Dans la plupart de cas, le convertisseur dédié à la PEMFC est unidirectionnel en courant et fonctionne en mode élévateur de tension. Le convertisseur connecté aux UCs fonctionne en survolteur lorsque ceux-ci fournissent transitoirement une partie de la puissance motrice, et opère en dévolteur lorsque les UCs récupèrent l'énergie de freinage ou lorsqu'ils sont chargés par la PEMFC. Le diagramme de la Figure 4.1 ci-dessous représente les différents types d'architectures actives permettant le partage des puissances dans le système hybride.



(a) à deux convertisseurs



(b) à un seul convertisseur unidirectionnel



(c) à un seul convertisseur bidirectionnel

Figure 4.1 – Différents architectures du système de puissance hybride active PEMFC/UC

En général, il existe deux possibilités dans la configuration du système hybride actif, en fonction du nombre de convertisseurs retenus et de la position du convertisseur DC/DC :

- L'architecture d'hybridation à deux convertisseurs qui consiste à associer un convertisseur à chaque source, les deux étant eux-mêmes connectés sur un bus DC. Cette structure permet de réguler la puissance de chaque source. La structure à deux convertisseurs est pratique puisqu'elle permet une gestion énergétique idéale des UCs (grâce au degré de liberté supplémentaire offert par ces structures), un bus DC bien régulé en tension (idéal pour les charges), ainsi qu'un filtrage adéquat pour la PEMFC (fonction de la capacité de stockage). Cependant, les pertes associées à la présence de convertisseurs statiques sont majorées ainsi que le coût de la structure ;
- L'architecture d'hybridation à un seul convertisseur qui consiste à relier la PEMFC ou les UCs au bus DC via un convertisseur DC/DC unidirectionnel ou bidirectionnel en courant, l'autre élément étant alors connecté directement au bus DC. Dans ce cas, la tension de la PEMFC ou des UCs (respectivement) peut être directement contrôlée tandis que la tension des UCs ou de la PEMFC (respectivement) doit correspondre au niveau de tension du bus continu. Les avantages principaux sont ici la réduction des pertes et de coûts liés à l'utilisation d'une seule interface de gestion de puissance. En revanche, ceci est à payer au prix d'une tension de bus variable dont la variation peut être diminuée au moyen d'un surdimensionnement de la capacité des UCs ou de la PEMFC suivant la structure employée [26].

L'architecture passive est une solution simple et peu onéreuse. Elle consiste à interconnecter directement la PEMFC et les UCs sur le bus continu du système [26, 27, 29]. Dans cette architecture, les UCs absorbent l'excès de puissance de la PEMFC, permettant non seulement de récupérer l'énergie de freinage, mais aussi de fournir une fraction de la puissance transitoire pour l'accélération du véhicule [148, 150]. Cette configuration présente les avantages de ne pas mettre en jeu le convertisseur statique et d'une autogestion énergétique naturelle où la répartition des puissances entre les sources est obtenue par le dimensionnement des éléments constituant le système hybride, ce qui peut augmenter légèrement le rendement global et réduire le coût total du système hybride passif [27, 29, 143, 151]. Toutefois, le contrôle du flux

énergétique n'est plus possible. Cela implique que : (i) le niveau de tension de la PEMFC ne peut pas être différent de la tension des UCs, et la taille de l'ensemble des UCs est déterminée par la tension de la PEMFC compte tenu que les UCs imposent leur propre limite supérieure de tension ; (ii) le système hybride passif est conditionné par la répartition du courant entre la PEMFC et les UCs, qui est déterminée par leurs résistances internes respectives ; (iii) la tension aux bornes du système hybride passif n'est pas régulée, elle permet une prise en compte des contraintes de chaque source et établit une corrélation entre la puissance moyenne et l'état de charge (SOC – State Of Charge) des UCs. Toutefois, elle nécessite un dispositif auxiliaire de démarrage lorsque les super-condensateurs sont déchargés. Par ailleurs, les pertes ohmiques des UCs induisent une transmission partielle des transitoires du courant de la charge vers la pile. La Figure 4.2 montre l'architecture du système de puissance hybride passive entre une PEMFC et un ensemble des UCs.

Un aperçu des recherches récentes sur l'hybridation passive PEMFC/UC a été mené comme suit : Garcia-Arregui et al., [148] analysent l'effet du dimensionnement dans la gestion naturelle d'énergie d'un système hybride passive composé d'une PEMFC et d'un ensemble d'UCs. Les auteurs proposent une méthode itérative de dimensionnement permettant d'obtenir une distribution de puissance adéquate entre les deux sources. La PEMFC est dimensionnée en tenant compte du nombre de cellules individuelles connectées en série et de la surface active du stack, tandis que l'ensemble d'UCs est dimensionné grâce aux contraintes énergétiques et dynamiques requises par le système. Cette méthode consiste à récupérer les dernières données de simulation et redimensionne le système en fonction des limites non respectées : le point de

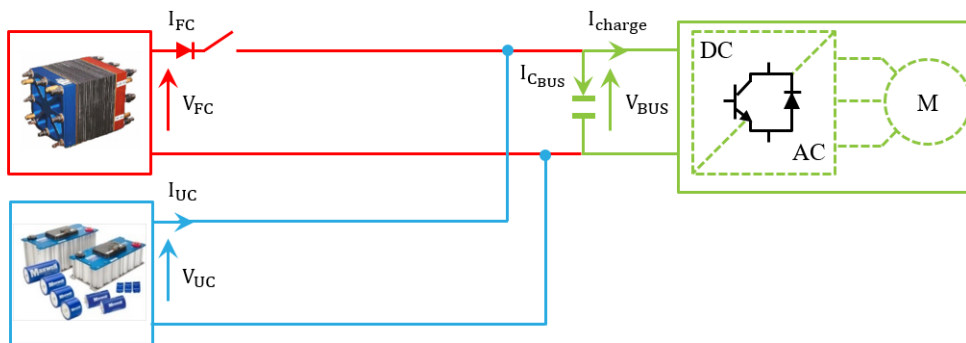


Figure 4.2 – Architecture du système de puissance hybride passive PEMFC/UC

fonctionnement nominal de la PEMFC va être imposé par la valeur minimale de la tension et celle de la densité de courant maximale. Une fois les critères de dimensionnement respectés, la boucle est stoppée. Junbo et al., [144] étudient le comportement électrique lors de l'hybridation passive d'une PEMFC vue comme source principale d'énergie et des UCs en tant que source de stockage pour un application vélo. Les résultats suggèrent que la PEMFC peut fournir la puissance nominale moyenne à la charge et le système de stockage peut fournir la puissance au démarrage du système, elle peut également améliorer l'efficacité, la puissance crête et prolonger l'autonomie du système. En outre, les UCs permettent de réduire la dynamique de puissance fournie par la PEMFC.

Zhao et Burke [150] comparent l'hybridation des FC/UC en utilisant différentes configurations de sources et stratégies de contrôle pour la distribution de la puissance. Les configurations considérées sont les suivantes : (i) une FC comme seule source d'énergie ; (ii) hybridation passive des FC/UC ; (iii) hybridation active FC/UC via un seul convertisseur bidirectionnel et ; (iv) hybridation active FC/UC via un seul convertisseur unidirectionnel. Une étude du potentiel économique au niveau composant/système est menée prenant en compte l'efficacité dans la consommation du combustible pour véhicules de taille similaire et ayant les mêmes caractéristiques et profils de charge. Les résultats de simulation démontrent que l'architecture hybride passive FC/UC augmente l'efficacité globale du système principalement en raison de l'élimination des pertes d'énergie causées par l'électronique de puissance. Hinaje et al., [28] proposent la mise en place d'une PEMFC comme une source de courant contrôlée par le débit d'hydrogène. Le point de fonctionnement de la pile à combustible est alors maintenu dans une zone de densité de courant élevée. Le travail se concentre principalement sur le transfert de masse dans les électrodes pour décrire le comportement électrique transitoire. Ceci est fait pour l'hybridation passive des PEMFC/UC et le court-circuit d'un PEMFC. Après cette expérience, la dégradation dans la PEMFC n'a pas été révélée. Récemment, Morin et al., [26] étudient l'hybridation passive d'une FC par des UCs ; les propriétés statiques et dynamiques au niveau de chaque cellule individuelle du stack sont identifiées. Yalcinoz et Alam [152] proposent des stratégies de contrôle pour l'hybridation passive d'une PEMFC par des UCs dans une application portable. Un modèle dynamique de la PEMFC est évalué sous diverses conditions de charge. Les UCs fournissent les variations de charge et la demande de puissance transitoire

d'un ordinateur portable.

L'hybridation passive des FCS par des batteries a été étudiée par Bernard et al., [29]. Les auteurs décrivent le comportement de l'hybridation passive d'un FCS par des batteries pour des applications aéronautiques. La distribution de la puissance est contrôlée en ajustant la pression de fonctionnement de la FC. D'autre part, l'hybridation passive d'une PEMFC H_2 /Air par un pack de batteries Li-ion pour des applications aéronautiques a été également proposée dans [27]. Les résultats démontrent une augmentation de l'efficacité énergétique du système et une bonne réponse à la demande de charge dynamique après l'hybridation passive.

Soulignons que seulement quelques études proposent une analyse détaillée de la dégradation d'une PEMFC lorsqu'elle est soumise à des courants de forte intensité ou en présence d'une condition de court-circuit [28, 67, 153]. Les études d'une PEMFC sur ces conditions de fonctionnement montrent que, d'une part, les risques de dégradation après un court-circuit sur une période longue sont irréversibles : i.e. fusion des électrodes dû à une augmentation de température ou au moins un vieillissement accéléré. D'autre part, dans des conditions particulières, par exemple lors de fortes sollicitations de courant pendant des périodes courtes, on augmente la température et cela génère un excès d'eau liquide qui permet de diminuer la résistance membranaire et de réduire les pertes ohmiques (i.e. des micro court-circuits sont utilisés sur le stack Horizon comme une technique de réhydratation de la membrane) [67]. Une telle utilisation des courts-circuits courts est alors bénéfique au fonctionnement instantané de la pile à combustible. Après un court-circuit se produisant dans une PEMFC, certaines cellules individuelles peuvent également développer une résistance ohmique significative en comparaison avec celle du reste du stack. Comme le courant demandé par la charge reste identique, ces cellules peuvent présenter une chute de tension excessive et même conduire à des potentiels négatifs [67].

4.2 Simulation de l'hybridation passive PEMFC/UC

Cette section présente les résultats de simulation de l'hybridation passive d'une PEMFC par des UCs. La PEMFC et l'ensemble d'UCs sont connectés comme illustré sur la Figure 4.3. Le PEM-FCS est considéré comme étant une source active tandis que l'ensemble d'UCs comme

une source passive, le courant du système I_{FC} est fonction de leur différence de potentiel et limité par les résistances internes des sources. La première simulation correspond à la connexion de deux sources ; cela permet d'étudier le transitoire électrique lorsque les sources sont connectées. Ensuite, un système complet source-charge est considéré. Ceci permet d'étudier la gestion naturelle d'énergie parmi les sources.

Le modèle du FCS proposé est divisé en trois parties : le groupe moto-compresseur pour comprimer l'air, le circuit d'alimentation en hydrogène et en oxygène, et la PEMFC elle-même. Le modèle et les paramètres normalisés sont présentés en détail dans l'Annexe A.

Le modèle des UCs est le circuit équivalent proposé par Zubieta et Bonert [5] et illustré sur la Figure 4.4. Ce circuit équivalent est valable uniquement dans les basses fréquences, mais pour des applications typiques telles que dans les véhicules hybrides électriques (HEV – Hybrid Electrical Vehicles), les UCs fonctionnent à basse fréquence électrique [6]. Le modèle de circuit équivalent utilisé considère seulement une branche principale montrant la capacité principale et la résistance interne et une branche secondaire qui modélise la répartition des charges. Nous considérons ce modèle, non seulement pour sa relative simplicité mais aussi parce que les auteurs ont proposé les essais nécessaires pour trouver les paramètres du modèle.

Remarque : puisque vous ne pouvez pas connecter deux sources de tension en parallèle, et pour effectuer les simulations, nous avons décidé de représenter l'une des deux sources comme une source de courant. La nature des deux est essentiellement source de tension, en particulier en ce qui concerne les UCs de par sa nature capacitive (source de tension). Cependant, compte tenu que le modèle de simulation de la PEMFC est plus complexe, nous avons préféré modifier les équations du modèle des UCs pour qu'il soit un modèle de tension d'entrée et sortie en courant. Ces hypothèses simplificatrices nous ont permis d'effectuer les simulations présentées à continuation, et d'une certaine manière, nous a permis d'avoir un aperçu du comportement du système qui représente le "pire de cas". Une solution alternative qui serait comparable et qui devrait être étudiée consiste à inclure un élément de couplage entre les deux sources : une inductance de lissage. L'inclusion de l'inductance de lissage doit être considérée sans aucun doute pour une analyse plus détaillée et une validation du schéma de connexion de la source hybride. Elle n'a pas été considérée, en premier lieu, parce que l'objectif était de vérifier les résultats obtenus à partir de l'expérience en court-circuit.

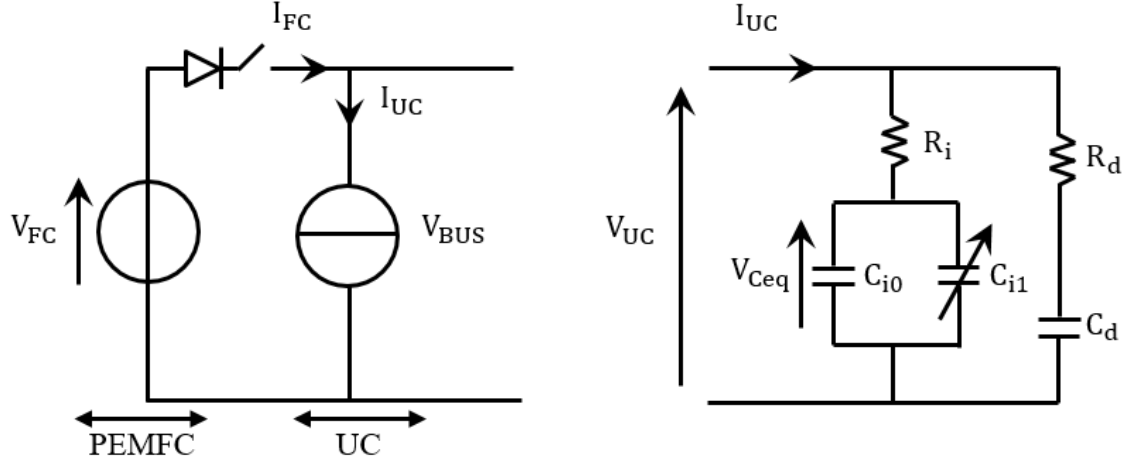


Figure 4.3 – Hybridation passive PEMFC/UC Figure 4.4 – Modèle du circuit équivalent UC

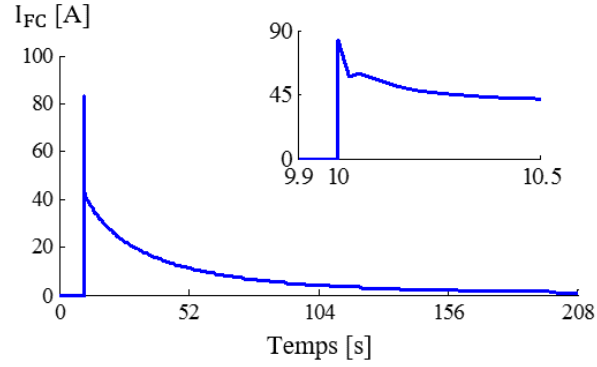
4.2.1 Interconnexion entre la source PEMFC et l'ensemble d'UCs

Le nombre de cellules de la PEMFC ($N_{cell_{FC}}$) ainsi que le nombre de cellules des UCs ($N_{cell_{UC}}$) doit être sélectionné attentivement pour éviter un fonctionnement dans des zones au-delà des valeurs nominales. La tension nominale de la PEMFC dépend du nombre de cellules en série, qui dépend également du nombre de cellules connectées en série des UCs. Il convient de trouver une valeur de tension proche entre ces sources, compte tenu du fait que la tension nominale des UCs doit être égale ou inférieure à la tension nominale de la PEMFC. En état d'équilibre, c'est-à-dire quand les UCs sont chargés, la tension des UCs est équivalente à la tension de la PEMFC en conditions de circuit ouvert. Pour éviter d'endommager les UCs, le nombre de cellules dans la PEMFC est choisi en tenant compte de la tension nominale des UCs. Néanmoins, pour obtenir des tensions supérieures dans les UCs, des cellules multiples peuvent être connectées en série [5, 154].

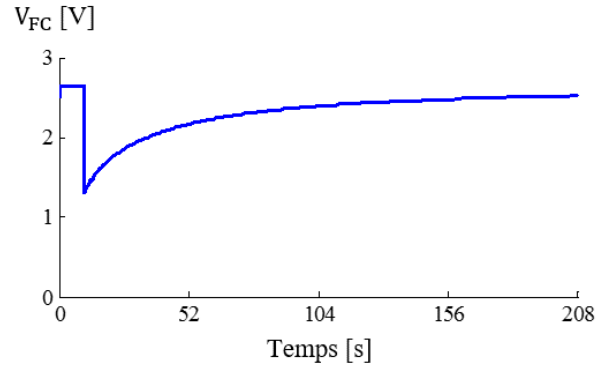
Pour les simulations présentées dans cette section, on considère une valeur maximale de tension par cellule équivalente à 2.7 V. Les valeurs du circuit équivalent sont obtenues à partir de [5] tels que résumés dans le Tableau 4.1. La PEMFC est composée de trois cellules et une tension de circuit ouvert de 2.64 V. La PEMFC et les UCs sont connectés à $t=10$ s, comme illustré dans la Figure 4.3. Afin de protéger les UCs contre une surtension qui pourrait les endommager définitivement, un système de protection doit être mis en place pour débrancher les UCs de la PEMFC lorsque la tension des UCs dépasse leur valeur nominale.

Tableau 4.1 – UC1 (Nominal 470 F) extrait à partir de [5]

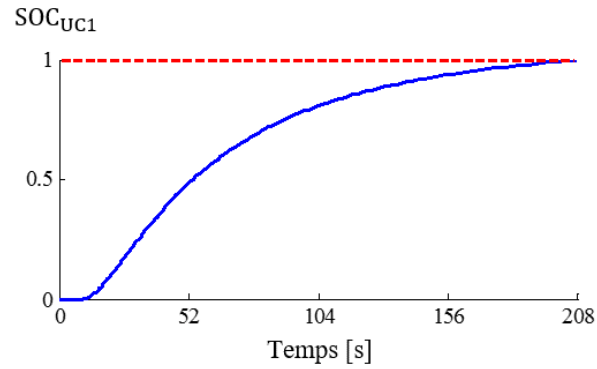
Paramètres	C_{i0} F	C_{i1} F · V ⁻¹	C_d F	R_i mΩ	R_d Ω	V_{nom} V
Valeurs du circuit équivalent	270	95	100	2.5	0.9	2.5



(a) PEMFC courant



(b) PEMFC tension



(c) UC1 état de charge

Figure 4.5 – État de charge initial $SOC_{UC1} = 0 \%$ (démarrage à $t=10$ s)

Tableau 4.2 – Bilan énergétique de la charge des UC1

Tension initiale Paramètre		0 % V_{nom}	25 % V_{nom}	50 % V_{nom}	75 % V_{nom}
E_{FC}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	2.9628	2.5523	1.9529	1.1143
E_{Cd}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	0.2293	0.2184	0.1733	0.0938
E_{Ceq}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	1.8335	1.7636	1.4989	0.9421
E_{Ri}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	0.6562	0.4374	0.2236	0.0648
E_{Rd}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	0.2435	0.1330	0.0572	0.0137
t_{charge}	s	208	194	177	145
I_{max}	A	82.93	69.42	47.9	26.37
$\frac{E_{\text{C}}}{E_{\text{FC}}}$		0.6962	0.7766	0.8563	0.9296

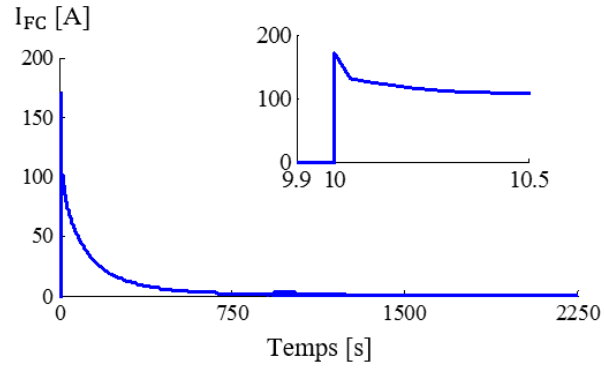
La Figure 4.5 présente la charge des UCs lorsque la tension initiale est fixée à zéro ; c'est-à-dire quand les UCs sont complètement déchargés. La Figure 4.5 illustre également le SOC défini comme le rapport entre la capacité restante et la capacité nominale de la source de stockage d'énergie. l'état de charge est un indicateur de la quantité d'énergie disponible à l'approvisionnement ou qui peut être récupérée dans la source de stockage, exprimée sous forme de pourcentage de la capacité maximale.

Le Tableau 4.2 récapitule le bilan énergétique pendant toute la durée de la charge et à différentes conditions initiales de tension. Dans ce tableau, E_{FC} représente l'énergie fournie par la PEMFC au cours de toute la période. E_{Ceq} et E_{Cd} représentent l'énergie accumulée dans la branche principale et secondaire respectivement (l'énergie est fournie uniquement par la PEMFC, sans tenir compte de l'énergie initiale). E_{Ri} et E_{Rd} représentent les pertes d'énergie par effet Joule dans les résistances de la branche principale et secondaire, respectivement. Finalement, t_{charge} représente le temps de charge des UCs et I_{max} représente le courant de crête.

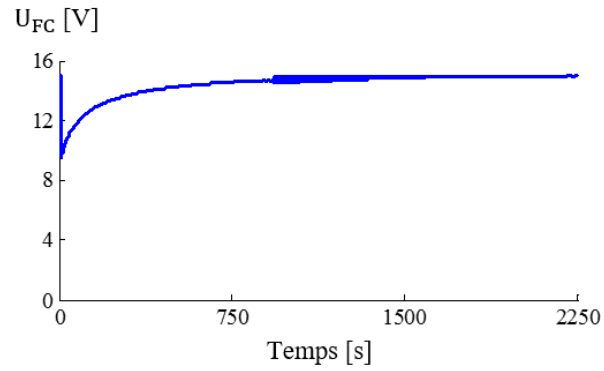
Afin d'évaluer avec une seconde simulation, pour un UC différent, est effectuée en considérant les valeurs des UCs présentées par [154] et résumées dans le Tableau 4.3. Ces valeurs représentent un ensemble d'UCs composé de six cellules mises en série. Le nombre de cellules de la PEMFC est ici imposé à une valeur de $N_{\text{cell}_{\text{FC}}} = 18$. La Figure 4.6 et le Tableau 4.4 synthétisent les résultats.

Tableau 4.3 – UC2 (Nominal 583 F) extrait à partir de [6]

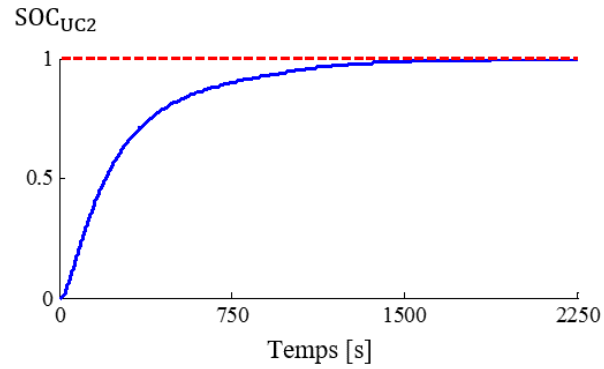
Paramètres	C_{i0} F	C_{i1} F · V ⁻¹	C_d F	R_i mΩ	R_d Ω	V_{nom} V
Valeurs du circuit équivalent	422	28.36	82.09	0.091	2.53	15



(a) PEMFC courant



(b) PEMFC tension



(c) UC2 état de charge

Figure 4.6 – État de charge initial $SOC_{UC2} = 0 \%$ (démarrage à $t=10$ s)

Tableau 4.4 – Bilan énergétique de la charge des UC2

Tension initiale Paramètre		0 % V_{nom}	25 % V_{nom}	50 % V_{nom}	75 % V_{nom}
E_{FC}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	172.30	148.79	113.76	65.056
E_{C_d}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	9.19	8.61	6.88	3.993
E_{Ceq}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	110.84	106.87	91.01	57.223
E_{R_i}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	45.58	29.74	14.42	3.526
E_{R_d}	$\text{kW} \cdot \text{s}$	6.70	3.57	1.47	0.316
t_{charge}	s	2250	2190	2155	2032
I_{max}	A	170.6	127.9	85.2	42.5
$\frac{E_{\text{C}}}{E_{\text{FC}}}$		0.6966	0.7761	0.8605	0.9410

Les résultats de simulation montrent que, lorsque les sources sont reliées entre elles, un courant transitoire de forte amplitude s'écoule à travers les sources. Ce pic de courant dépend naturellement de la condition initiale de la tension (i.e. l'état de charge) des UCs. La valeur du courant de crête peut être beaucoup plus élevée que la valeur nominale du courant dans la pile. L'effet des courants de forte amplitude circulant dans la PEMFC est étudié dans la section suivante.

La branche principale des UCs accumule presque la totalité de l'énergie et juste un petit pourcentage est accumulé dans les branches secondaires. Recharger l'ensemble d'UCs à partir d'une basse tension génère des pertes d'énergie par effet Joule comme le montrent le Tableau 4.2 et le Tableau 4.4. Les pertes se produisant lorsque les UCs sont complètement déchargés sont d'environ 30 % de l'énergie fournie par la PEMFC ; les pertes se produisant lorsque les UCs sont chargés à 50 % sont autour de 5–10 %, ce qui est nettement plus raisonnable. Compte tenu de ce qui précède, il peut être conclu que ce n'est pas intéressant d'opérer les UCs en basse tension en raison des pertes élevées. Pour éviter le fonctionnement en basse tension et afin d'éviter les décharges profondes dans les UCs, une stratégie pour le branchement et le débranchement des UCs au PEM-FCS doit être pris en considération. Par ailleurs, si l'ensemble d'UCs et la PEMFC sont connectés avant le démarrage de cette dernière ; le courant de crête instantané maximal peut être réduit si la PEMFC est alimentée progressivement en gaz réactifs, ce qui conduit à une augmentation progressive de la tension, comme démontré dans [28].

Étant donné que dans cette configuration, il n'existe pas de convertisseur pour contrôler le flux de puissance de la source hybride, une solution pour protéger les UCs des surtensions, consiste à limiter le nombre de cellules dans la PEMFC, compte tenu de la tension nominale des UCs. Cette solution présente toutefois l'inconvénient de ralentir la charge des UCs quand la tension des UCs s'approche de la tension de la PEMFC. Cela s'explique du fait que, lorsque les UCs atteignent leur capacité de charge maximale, la différence de potentiel entre les sources hybrides est très faible, ainsi que le courant de charge des UCs (i.e. dans le Tableau 4.4, le temps de charge du premier ensemble d'UCs, de 0 à 50 % est inférieur à deux minutes, tandis que le temps de charge de 50 à 100 % est supérieur à 30 minutes). Une solution de recharge rapide consiste à utiliser plusieurs cellules dans la PEMFC. Dans ce cas, une protection doit être considérée comme l'utilisation d'une diode Zener ; néanmoins, cette solution augmente les pertes dans le circuit, l'efficacité énergétique de cette solution se situe autour du 90 % comme étudié par [155–157].

4.2.2 Configuration PEMFC/UC/Charge

Dans le cadre de l'application de la source hybride, dans cette section, nous présentons les résultats de simulation de l'hybridation passive d'une PEMFC par un ensemble d'UCs. La source est utilisée pour fournir la puissance nécessaire à la propulsion d'un HEV. Le profil de puissance employé à effet de ces simulations correspond aux mesures recueillies sur le véhicule hybride lourd ECCE. Ce laboratoire mobile de 14 tonnes, appartenant à la Fédération de Recherche CNRS FCLAB à Belfort, France, est équipé de différentes sources et stockeurs d'énergie (telles qu'une PEMFC, UCs, batterie, moteur à combustion interne). Il est utilisé pour étudier la mise en œuvre et la gestion d'énergie des sources hybrides pour les HEV [6].

L'ensemble d'UCs est construit à partir de deux modules de 36 cellules en série. Ces deux modules sont connectés en parallèle. La valeur nominale des UCs est de 90 V – 195 F. La puissance maximale de la PEMFC est ici de 14 kW et son courant nominal est de 155 A. La tension de circuit ouvert est 90 V. Le stack contient 110 cellules avec une surface active de 800 cm². Le profil de puissance a été mesuré sur le fonctionnement réel du véhicule [6]. Cependant, dans les simulations, seul un des deux stacks est considéré et donc la puissance est réduite tel qu'illustré sur la Figure 4.7.

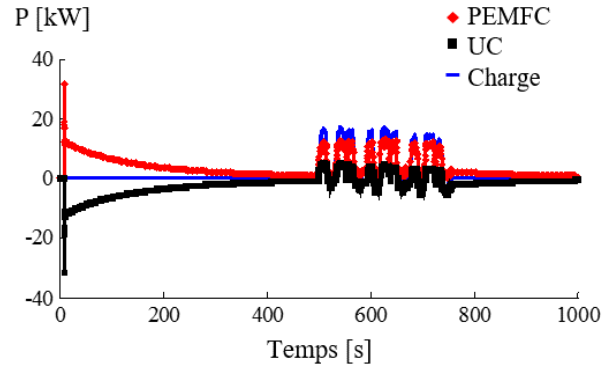
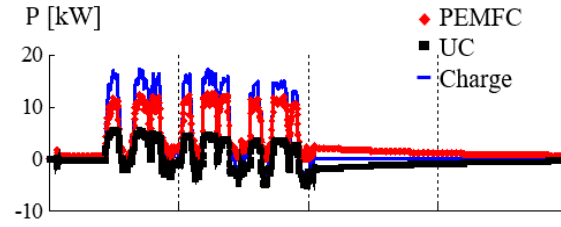
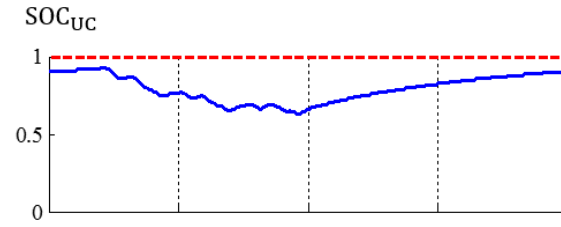


Figure 4.7 – Résultats de simulation lors de l’hybridation passive PEMFC/UC/Charge

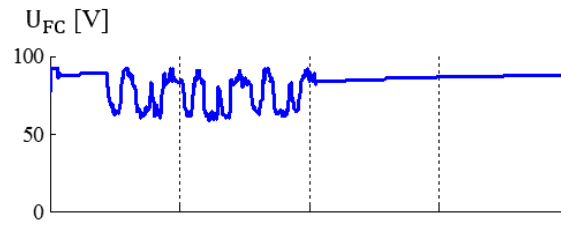
Les simulations sont divisées en trois parties. Les dix premières secondes, les sources sont déconnectées et ce temps représente le démarrage de la PEMFC. Les UCs sont initialement déchargés (SOC=0 %). À $t=10$ s, l’ensemble d’UCs est relié à la PEMFC et cette source commence à charger les super-condensateurs. Le SOC à l’état de charge final est ici de 85 % en raison de la longue durée de charge, mais surtout en raison du courant de charge (voir la Figure 4.6). À $t=500$ s, le véhicule démarre et cesse de fonctionner après quatre minutes. À la fin de cette période, la PEMFC recharge les UCs. La Figure 4.7 et la Figure 4.8(a) présentent la distribution de puissance obtenue pour le profil de puissance considéré partant d’un état initial de charge des UCs de 0 % et 90 % respectivement. Le pic de courant (et de fait les pertes associées) obtenus lors de la connexion PEMFC/UC est beaucoup plus élevé lorsque l’état de charge des UCs est faible. La Figure 4.8(b) à la Figure 4.8(d) illustre respectivement la répartition de puissance, l’état de charge des UCs, la tension et le courant de la PEMFC, partant d’un état initial de charge des UCs de 90 %.



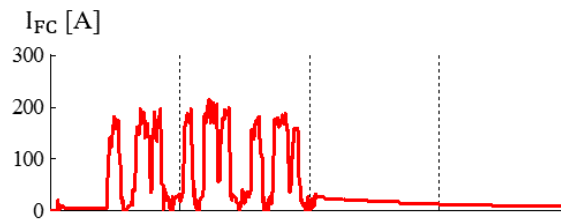
(a) Répartition de puissance



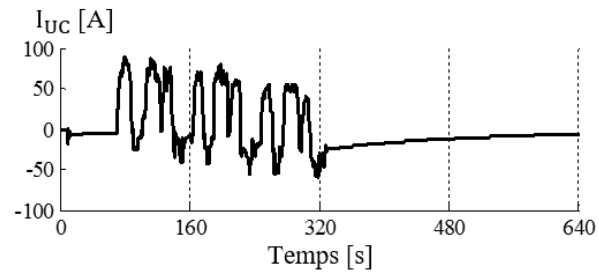
(b) UC état de charge



(c) PEMFC tension



(d) PEMFC courant



(e) UC courant

Figure 4.8 – Résultats de simulation lors de l'hybridation passive PEMFC/UC/Charge (zoom)

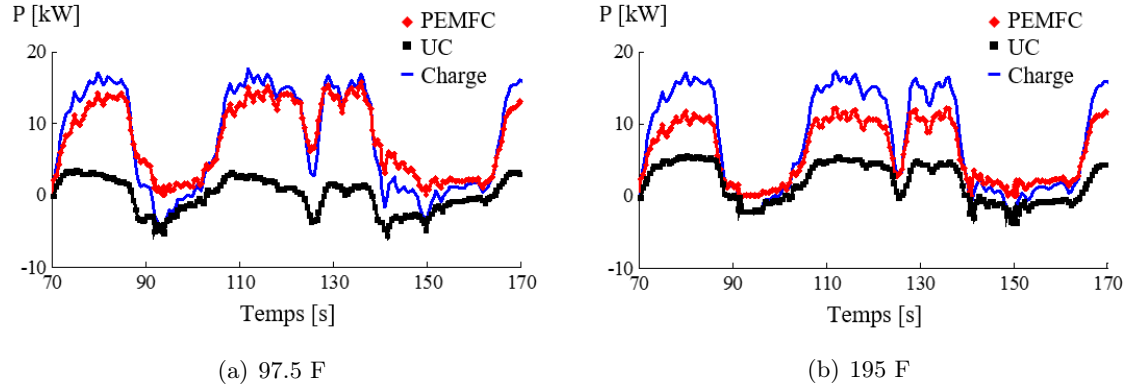


Figure 4.9 – Hybridation passive PEMFC/UC/Charge pour différents valeurs d'UCs

D'autres simulations sont effectuées pour le profil de puissance considéré lorsqu'on augmente la taille des UCs. La Figure 4.9(a) présente la répartition de puissance attendue pour les UCs de 97.5 F. La Figure 4.9(b) présente les résultats obtenus en considérant un ensemble d'UCs de 195 F. L'augmentation de la taille de la capacité des UCs réduit la puissance fournie par la PEMFC. Les pics de courant dans la PEMFC sont de 288 A, 214 A, 177 A, et 153 A pour un ensemble d'UCs de 97.5 F, 195 F, 292.5 F et 390 F respectivement. Avec une capacité supérieure des UCs (l'UC agit comme un filtre). L'inconvénient naturel est l'augmentation de la quantité des UCs (i.e. le coût, le poids et le volume du système) ainsi que le temps et la puissance-crête servant à recharger les UCs.

4.3 Étude de la dégradation d'une PEMFC soumise à tenues de courant élevé

Comme nous l'avons présenté dans la section précédente, lorsque les UCs sont reliés à la PEMFC, le courant circulant à travers la FC peut atteindre des valeurs très élevées par rapport à sa valeur nominale (typiquement de 5 à 10 fois la valeur nominale de densité de courant). Les sollicitations de courant à haute intensité pendant une durée réduite ont montré des améliorations dans la performance de la FC, due à l'élimination des espèces réactives de l'oxygène de la surface de platine. Éventuellement, à des densités de courant élevées, l'eau produite dans la réaction électrochimique est suffisante pour maintenir une humidification adéquate dans les cellules.

À titre d'exemple, dans les FCS développés par Horizon Fuel Cell technologies, un court-circuit contrôlé est appliqué pour réduire la dégradation du système ; ceci dans le but d'augmenter la durée de vie et conserver des performances élevées sur le long terme. Un tel court-circuit contrôlé permettra également d'améliorer les performances de la pile à combustible surtout dans les applications où le stack est éteint pendant une période prolongée. Toutefois, afin de maintenir un état homogène d'hydratation de la membrane dans la FC, plutôt qu'un court-circuit long, une série de court-circuits sont imposés pendant une durée de quelques millisecondes. Dans cette étude, la durée du court-circuit est maintenue quelques secondes (trois ordres de grandeur plus élevée). Ainsi nous pouvons aisément supposer que les conséquences d'un tel court-circuit sont différentes de celles, bénéfiques, d'une série de courts-circuits contrôlés de faible durée.

L'objectif de cette section est de vérifier la tenue aux courants de court-circuit de la pile à combustible. L'idée est d'étudier expérimentalement l'effet des courants élevés sur la durée de vie des PEMFC et d'identifier les paramètres significativement impactés par un tel défaut. Pour atteindre cet objectif, un essai expérimental original est réalisé. Un banc d'essai est mis en œuvre servant à court-circuiter les électrodes de la pile à combustible et ensuite imposer au système de fournir un courant maximal. Ceci permet d'étudier le fonctionnement de la PEMFC dans le pire des cas. Si l'on fait le parallèle avec l'étude menée précédemment en simulation, cette condition se produit quand l'ensemble d'UCs déchargé est relié brusquement à la PEMFC ou alors en cas de défaut franc sur le convertisseur statique de sortie de la pile à combustible (défaut de type "composant semi-conducteur fermé en permanence").

4.3.1 Caractéristiques de la pile à combustible considérée et du banc d'essai

La pile à combustible est alimentée en hydrogène et en oxygène provenant de l'air. Elle est constituée de 40 cellules et d'une surface active de 220 cm^2 connectées électriquement en série. Les coefficients de stœchiométrie de l'hydrogène et de l'air sont égaux à 1.5 et 2 respectivement, en conditions nominales. Les niveaux d'hygrométrie côté anodique et cathodique sont équivalents à 50 % (l'air et l'hydrogène sont pré-humidifiés). Le courant nominal de la PEMFC est de 110 A (soit $0.5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$). La température de fonctionnement de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ est définie par la température en sortie du circuit d'eau de refroidissement. La tension moyenne aux bornes

d'une cellule est de l'ordre de 0.7 V et la puissance nominale de la pile est de 3080 W.

Le banc d'essai illustré sur la Figure 4.10 permet de tester des FCS en régimes statique et dynamique [158]. Ce banc est composé de plusieurs sous-systèmes : (i) deux circuits de gaz pour alimenter la pile en combustible (H_2) et en comburant (Air) avec une humidité contrôlée ; (ii) une charge électronique pilotable pour évacuer l'énergie électrique fournie par la pile ; (iii) un circuit de refroidissement (eau déionisée) dédié à la régulation en température de la pile. Le banc d'essai dispose de différents capteurs permettant le retour d'information sur l'état de fonctionnement du stack. Ces capteurs permettent de mesurer : (i) les débits, les pressions, les hygrométries et les températures des gaz en entrée et en sortie du stack ; (ii) le débit, les pressions et les températures d'entrée et de sortie de l'eau de refroidissement et ; (iii) le courant, les tensions du stack et des cellules individuelles ainsi que des groupes de cellules.

Le contrôle/commande utilise un système d'acquisition National Instruments et un logiciel de commande développé sous LabView. Ce logiciel permet aussi de contrôler la charge électronique et d'afficher et enregistrer les paramètres tels que température, courant, tension, débit d'air, débit d'hydrogène, etc.

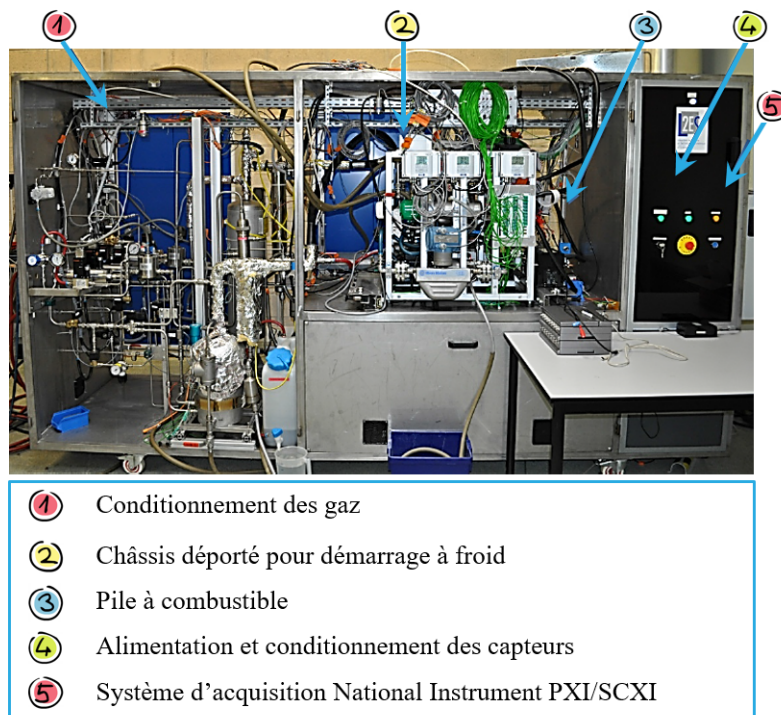


Figure 4.10 – Banc d'essai 5 kW développé au FCLAB

4.3.2 Procédure du court-circuit

Pour effectuer un court-circuit aux bornes de la PEMFC, on ajoute au schéma illustré dans la Figure 4.11, un interrupteur dont on peut contrôler l'instant de fermeture et d'ouverture du circuit, en série avec un fusible et un capteur à effet hall qui mesure le courant. L'interrupteur contrôlé depuis le software permet de fixer l'instant d'apparition du court-circuit. Les fusibles sont utilisés comme un procédé de protection de redondance, ainsi qu'un interrupteur manuel au cas où un problème de commande survient.

Un court-circuit est imposé aux bornes de la PEMFC pendant une durée réduite de 10 s. Il est à souligner que la conduite de ce type d'essai expérimental sur une pile à combustible de telle puissance est une première à notre connaissance. Compte tenu que l'objectif de l'étude n'est pas de réaliser un test destructif sur la pile à combustible (notamment du fait du coût d'un tel stack) la durée du court-circuit est limitée pour éviter les contraintes liées aux fortes contraintes thermiques qui peuvent causer une dégradation irréversible à la pile.

Les paramètres électriques, fluidiques et thermiques ont été mesurés avant, pendant et après le court-circuit contrôlé. Cela permet de comprendre les phénomènes physiques qui se produisent dans le stack. L'EIS est utilisée pour déterminer le comportement dynamique de la PEMFC, ainsi cette méthode est utilisée pour définir les conditions de référence permettant de quantifier la dégradation. Des spectres d'impédance sont relevés avant et après le court-circuit en utilisant un spectromètre forte puissance spécifiquement développé au sein de la Fédération

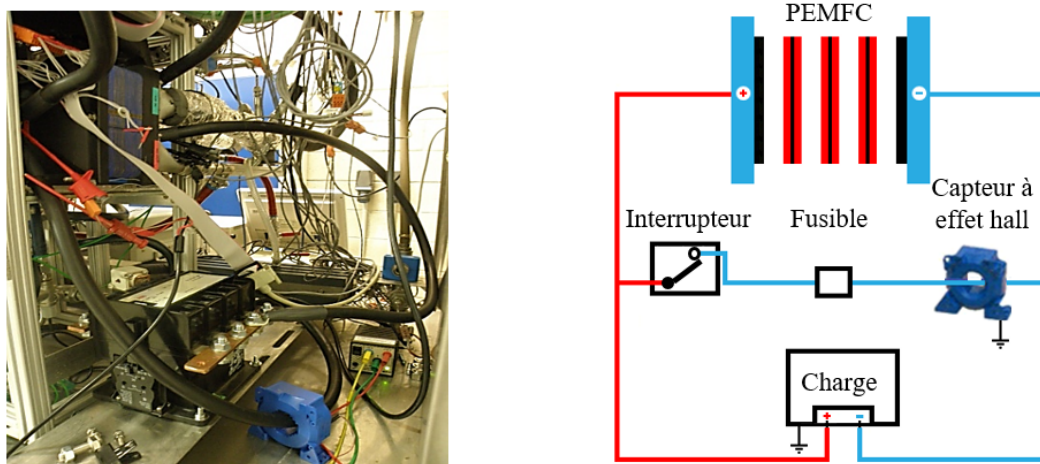


Figure 4.11 – Schéma du montage permettant le court-circuit

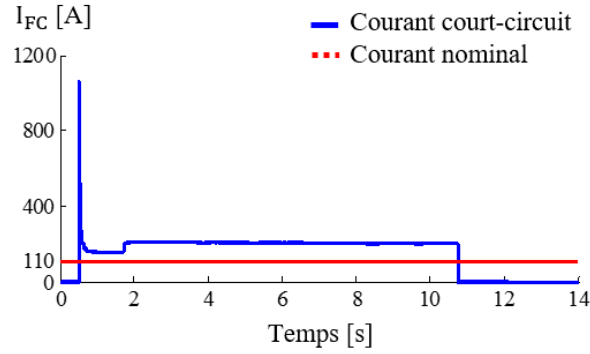
de Recherche CNRS FCLAB (voir S. Wasterlain [159] pour de plus amples informations sur ce sujet).

Les résultats des essais expérimentaux lors de la génération d'un court-circuit sont présentés sur la Figure 4.12 et la Figure 4.13. Ces figures montrent l'évolution des paramètres électriques, fluidiques et thermiques de la PEMFC lors de l'essai. La Figure 4.14 nous présente l'impact d'une défaillance électrique sur le comportement électrochimique de la PEMFC.

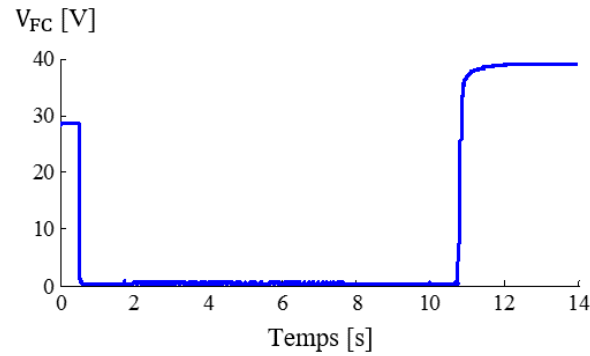
4.3.3 Résultats et analyse du comportement électrique

Cette section présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'essai de court-circuit. La Figure 4.12(a) et la Figure 4.12(b) illustrent le courant et la tension pendant le court-circuit. La Figure 4.12(c) présente la tension aux bornes de chaque cellule individuelle constituant le stack.

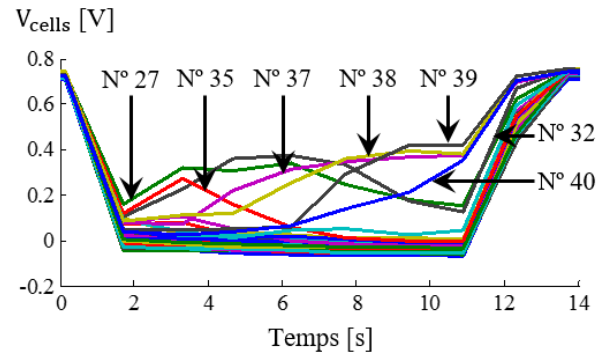
À partir de la Figure 4.12(a) nous observons que le courant de court-circuit (de 0.5 à 10.5 s) atteint une valeur de 1 100 A ($5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$), soit environ dix fois la valeur nominale du courant pour cette pile à combustible. Le pic de courant correspond à la consommation des gaz présents au sein des canaux de distribution. Cependant, ce courant diminue ensuite rapidement pour se stabiliser à une valeur de près de deux fois sa valeur nominale (220 A). Ici le courant est limité par les pertes de transfert de masse et par le débit d'hydrogène. Ceci confirme les résultats présentés par Hinaje et al., [28] qui utilise ce phénomène pour commander la pile à combustible comme une source de courant contrôlée par le débit d'hydrogène. Ce comportement électrique ressemble à celui du transitoire obtenu par simulation et présenté sur la Figure 4.5(a) et la Figure 4.6(a). La Figure 4.12(b) nous montre que la tension du stack chute à près de 0 V. De même, certaines cellules présentent des potentiels d'inversion tels qu'illustrés sur la Figure 4.12(c) et expliqués par [67]. Cela se produit principalement dans les cellules qui sont localisées loin de l'entrée d'air. A contrario, la Figure 4.12(c) montre également que dans certaines cellules la tension chute de 50 % seulement de sa valeur nominale, c'est surtout le cas des cellules situées à proximité de l'entrée d'air (cellules présentant des numéros d'ordre élevés). Il convient de noter que le court-circuit se produit lorsque la pile à combustible fonctionne à son point d'opération nominal (110 A). Après le court-circuit, la PEMFC est maintenue sous un mode de fonctionnement en circuit ouvert.



(a) Courant du stack



(b) Tension du stack



(c) Tension des cellules individuelles

Figure 4.12 – Comportement électrique de la PEMFC pendant le court-circuit

4.3.4 Résultats et analyse du comportement thermique et fluide

La Figure 4.13 présente un bilan de l'influence du défaut sur le comportement fluide et thermique de la PEMFC tout au long de l'essai. Il est important de souligner le fait que l'échelle de temps n'est pas la même que dans la Figure 4.12, cela est justifié par le fait que les constantes de temps fluidiques et thermiques sont beaucoup plus élevées que celles électriques ; dans la Figure 4.13 le court-circuit se produit à partir de 9 s et jusqu'à 19 s.

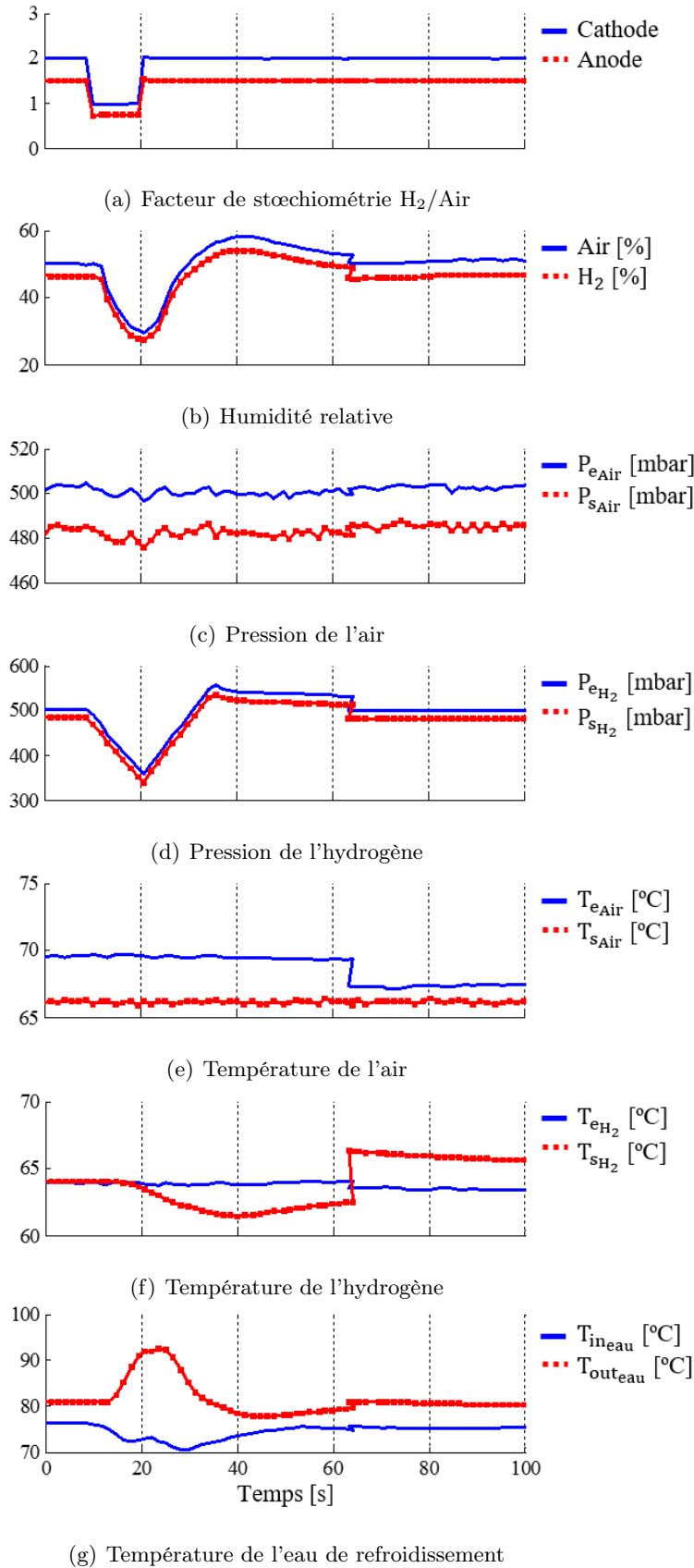


Figure 4.13 – Comportement fluide et thermique de la PEMFC pendant le court-circuit

Sur la Figure 4.13(a) on observe une diminution du facteur de stœchiométrie H_2/Air ; il passe de 1.5/2 à 0.75/1, respectivement. En effet, la production d'eau augmente et la consommation des gaz réactifs s'accélère. L'alimentation en gaz réactifs est proportionnelle au courant fourni et la quantité de chaleur qui doit être enlevée croît significativement. En outre, un fort courant génère une forte production d'eau à la cathode mais assèche la membrane par entraînement électro-osmotique. L'excès d'eau liquide contribue à la réduction de la résistance de la membrane, tout en réduisant les pertes ohmiques dans la membrane [28, 153].

L'humidité relative, présentée sur la Figure 4.13(b), est calculée sur la base du point de rosée du gaz entrant et sur la température de la PEMFC. Il s'agit d'une image de l'humidité relative du gaz dans la PEMFC. La variation observée est liée à la variation de température dans la PEMFC pendant le court-circuit. Les flux d'hydrogène et d'oxygène sont consommés par la pile à combustible immédiatement dès que le court-circuit est appliqué. De la même manière, la Figure 4.13(c) et la Figure 4.13(d) nous montre que le système n'arrive pas à réguler la pression lorsque les gaz sont consommés.

A ce point de fonctionnement, on observe sur la Figure 4.13(g) un important dégagement de chaleur. La température initiale de la pile avant le défaut a été fixée à 80 °C, cette température étant régulée grâce au circuit de refroidissement piloté. La température maximale obtenue pendant le transitoire suite au court-circuit appliqué était de 92 °C. Cette température, rappelons-le, correspond à la température de sortie du circuit de refroidissement. Il est évident que des points chauds de température bien plus élevée sont à envisager au sein du stack.

Un courant élevé, même pendant un court laps de temps, provoque une augmentation de la température du stack ; la chaleur produite doit donc être évacuée. Cela entraîne un gradient thermique élevé, la température (mesurée sur la base de la température de l'eau de refroidissement) s'élève à 92 °C ; 15 % supérieure à la valeur nominale. La surchauffe locale résultant du court-circuit n'est pas compensée par le système de refroidissement. Nous pouvons observer sur la Figure 4.13(g) qu'il existe une bonne réponse du système de refroidissement en cas de court-circuit, mais cette action est trop lente pour contrecarrer l'augmentation globale de la température de la PEMFC au cours du défaut. On peut supposer que si le court-circuit avait été maintenu plus longtemps, la surchauffe locale aurait pu provoquer une destruction

des membranes. Dans notre cas, le court-circuit a été délibérément limité dans le temps afin d'éviter la destruction des membranes. Cela a été vérifié par le spectre d'impédance relevé avant et après l'essai de court-circuit.

Aucune étude détaillée préalable n'a été rapportée pour la compréhension des mécanismes de dégradation subie dans une pile à combustible fonctionnant à forte densité de courant. Gérard et al., [160] ont étudié les impacts sur les conditions locales et le vieillissement pendant l'appauvrissement en oxygène (généralement le même type de phénomène qui peut être obtenu localement pendant le court-circuit). En fait, beaucoup d'études expérimentales et théoriques ont été menées sur le cas de sous-stoechiométrie H_2 /Air et des densités de courant locales élevées associées (au-dessus de $2000 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ à l'entrée du stack) lorsque la stoechiométrie tends vers un. Évidemment, dans ce cas, la température qui augmente localement est très importante. Pour une valeur de température de 92°C à la sortie de l'eau de refroidissement, il est possible que certaines zones de la membrane puissent atteindre une température de 100°C , en particulier les zones associées à l'arrivée des gaz réactifs.

Selon [161], une augmentation du courant de charge est associée à une dissipation élevée de puissance à l'intérieur du stack et en conséquence à une élévation de la température. Une augmentation excessive de la température du stack entraîne une dégradation thermique, ce qui implique généralement des changements de poids moléculaire (et la distribution de poids moléculaire) du polymère et ses propriétés physiques tels que la diminution de sa ductilité, fissures et craquelures [23, 162, 163]. La chaleur excessive générée localement contribue également à la formation de trous dans la membrane électrolytique. L'effet de la perforation entraîne un pic de température et des densités de courant négatives, leur amplitude dépendra de la taille de la perforation et des conditions de fonctionnement du FCS.

L'alimentation en gaz réactifs est proportionnelle au courant fourni. Un courant élevé s'accompagne ainsi d'un fort dégagement de chaleur et par conséquent, il doit être évacué. Comme mentionné par [153], une surintensité de courant même pendant un intervalle de temps très court provoque une augmentation de la température de la PEMFC. Une augmentation de la température avec une hydratation adéquate peut contribuer à l'accélération du phénomène de diffusion de l'hydrogène dans la membrane électrolytique, ce qui réduit les pertes ohmiques potentielles. Néanmoins, dans [164], les auteurs suggèrent qu'un courant élevé génère une

production importante d'eau sur le côté cathodique, mais la membrane subira un assèchement due au phénomène d'électro-osmose.

Lors d'un court-circuit, les gaz réactants arrivent difficilement sur les sites de réaction, compte-tenu de la rapidité de leur consommation. Ainsi, les conditions de fonctionnement peuvent être identifiées se rapportant à la zone verticale de la courbe de polarisation (limitation due au transfert de masse). Si de fortes densités de courant sont supposées, les phénomènes de transport de masse limitent l'alimentation en gaz réactants et l'évacuation des produits [165]. Un gradient de concentration se produit contribuant à une perte de potentiel de cellule.

Si une cellule ne peut pas produire assez d'électrons/protons à partir du carburant hydrogène pour achever la réaction, compte-tenu des densités locales de courant, les particules de carbone servant de support du catalyseur réagissent pour faire la différence. Ce mécanisme de dégradation est connu comme corrosion du support de carbone, et il est très nocif pour la cellule. Si la corrosion du carbone se produit, ceci conduit à une inversion de tension dans la cellule. Ce mécanisme de dégradation peut survenir lorsqu'un appauvrissement en combustible se produit [165]. La corrosion du support de carbone se dégrade plus rapidement avec une humidité et une température élevées. Ce mécanisme conduit éventuellement à des changements structurels des propriétés de l'assemblage membrane électrodes, telles que l'hydrophobicité, à la modification des chemins de transport des protons et à un impact sur la gestion de l'eau dans la PEMFC. L'un des principaux effets est la diminution de l'activité catalytique [69, 74, 165].

4.3.5 Résultats et analyse du comportement dynamique via spectroscopie d'impédance électrochimique

Le comportement dynamique de la pile peut être analysé à partir des diverses techniques. Parmi le plus répandues on peut citer la spectroscopie d'impédance électrochimique. Cette méthode est classiquement utilisée pour évaluer l'évolution de l'état de santé à travers la l'impédance dynamique de la pile ; elle consiste à appliquer à la PEMFC une tension alternative sinusoïdale de faible amplitude (ou courant) en tant que signal de perturbation et mesurer la réponse en courant (ou la tension). La perturbation est appliquée pour des fréquences allant de quelques mHz à plusieurs kHz. L'intérêt principal de l'EIS est qu'elle permet de distinguer, dans le domaine fréquentiel, les contributions individuelles des processus dans les électrodes grâce

à des spectres d'impédance globaux. Elle fournit des informations sur l'échelle microscopique du système électrochimique [153]. Cette information est utile pour déterminer la structure optimale de la pile et pour sélectionner des conditions de fonctionnement appropriées.

Un spectre d'impédance est classiquement tracé sous la forme d'un diagramme de Nyquist ou de Bode. Dans un diagramme de Nyquist, la partie imaginaire de l'impédance est tracée en fonction de la partie réelle à chaque fréquence, tandis que, dans un diagramme de Bode, l'amplitude et la phase de l'impédance sont tracées en fonction de la fréquence. L'avantage de la représentation de Nyquist, est qu'elle donne un aperçu rapide des données et que des interprétations qualitatives sont faciles à effectuer. Toutefois, il n'est pas possible de connaître directement la fréquence à laquelle un point a été réalisé, sauf à graduer et tracer le diagramme de Bode.

Le comportement dynamique observé dans les spectres d'impédance se divise aussi en différentes zones. Généralement, selon les conditions opératoires du système, les diagrammes de Nyquist peuvent inclure un, deux ou trois arcs : (i) les arcs à basses fréquences ($f < 1$ Hz), on y observe les phénomènes de diffusion-convection, c'est-à-dire la diffusion et la convection des réactifs et produits de la réaction (H_2 à l'anode, O_2 et H_2O à la cathode) ; (ii) les arcs à moyennes fréquences ($1 \text{ Hz} < f < 1 \text{ kHz}$), on peut y voir les phénomènes d'accumulation des charges dans les doubles couches, ainsi que les phénomènes de transfert à l'anode et à la cathode. Autour de 1 kHz, l'impédance mesurée à une valeur proche de la résistance due à la membrane ; et (iii) les arcs à hautes fréquences ($f > 1 \text{ kHz}$), le comportement mesuré n'est plus dû directement à la pile combustible, mais plutôt à l'inductance des connecteurs et câbles.

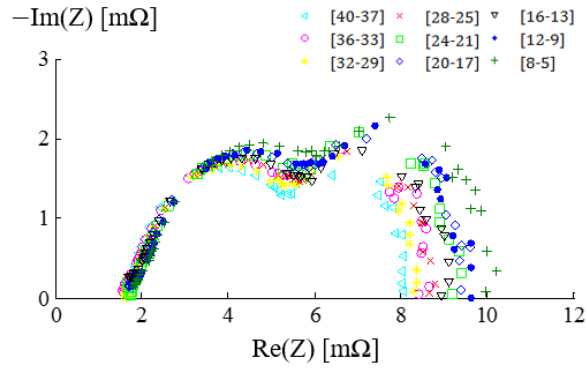
La Figure 4.14 présente les résultats des spectres d'impédance dans le plan de Nyquist avant et après l'apparition d'un court-circuit. Le Tableau 4.5 et le Tableau 4.6 résument les valeurs des résistances internes et de polarisation des cellules individuelles (par groupes de quatre cellules) et du stack obtenues pendant la durée de l'essai.

Tableau 4.5 – Résistances ohmiques : R_m m Ω . Avant et après court-circuit (10 s)

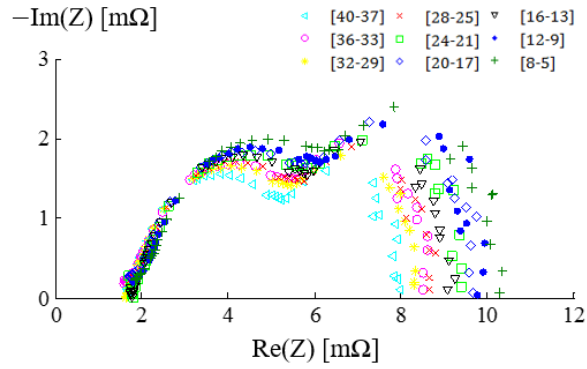
Cells	5–8	9–12	13–16	17–20	21–24	25–28	29–32	33–36	37–40	Stack
Avant	1.83	1.76	1.74	1.71	1.70	1.66	1.61	1.57	1.63	17.03
Après	1.87	1.80	1.72	1.71	1.72	1.68	1.62	1.58	1.63	17.24

Tableau 4.6 – Résistances de polarisation : R_p m Ω . Avant et après court-circuit (10 s)

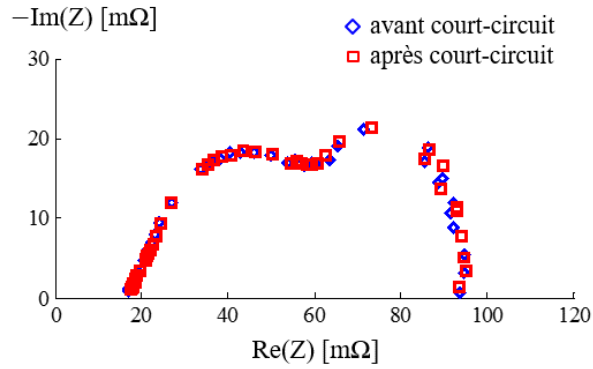
Cells	5–8	9–12	13–16	17–20	21–24	25–28	29–32	33–36	37–40	Stack
Avant	9.99	9.63	8.96	9.41	9.21	8.65	8.31	8.41	8.02	93.8
Après	10.2	9.72	9.02	9.46	9.30	8.69	8.26	8.59	7.87	94.4



(a) cellules individuelles avant l'apparition du court-circuit



(b) cellules individuelles après l'apparition du court-circuit



(c) stack avant et après l'apparition du court-circuit

Figure 4.14 – Diagrammes de Nyquist relevés dans des conditions de fonctionnement nominales

D'une manière générale, pour l'essai réalisé la dégradation physique de la pile au cours du test n'apparaît pas de manière prononcée sur les relevés de spectres d'impédance. Dans le cas particulier de l'analyse de l'évolution de la résistance en hautes fréquences, mesurée avant et après la génération du premier court-circuit (pendant dix secondes), la valeur de la résistance interne du stack augmente d'environ 1.23 % (passage de 17.0 à 17.2 m Ω). De même, pour les basses fréquences, la résistance de polarisation du stack évolue de 93.8 à 94.4 m Ω : soit une augmentation de 0.69 %. Les dégradations sont certainement réversibles, la valeur de la résistance interne du stack ne peut pas être utilisée comme un indicateur de dégradation après le court-circuit. Néanmoins, la résistance de polarisation du stack présente une légère augmentation après le défaut : ces dégradations ont une influence sur les arcs capacitifs en basse fréquence lié à des phénomènes de diffusion, à l'accumulation des défauts et au vieillissement naturel de la PEMFC.

Sur la base de ces essais expérimentaux, il est clair que l'effet global d'un court-circuit rapide ne semble pas affecter les performances du PEM-FCS. Néanmoins, à l'heure actuelle, aucune information relative à ce qui se passe localement sur l'ensemble membrane-électrode dans ces conditions opératoires n'a été retrouvée dans la littérature. En effet, l'élévation de température locale pourrait avoir un impact à moyen terme sur les performances de la pile ou encore sur sa capacité à être exploitée.

4.4 Conclusion

Ce chapitre présente une étude de simulation sur l'hybridation d'une PEMFC et un ensemble d'UCs sans l'aide d'un convertisseur de puissance. Des simulations ont été réalisées pour étudier l'hybridation passive de ces sources. Nous nous sommes intéressés d'abord à la période de recharge des UCs et ensuite à l'alimentation d'une charge. Les résultats obtenus permettent de montrer que la gestion "naturelle" de l'énergie entre les deux composants de l'architecture est opérée de façon satisfaisante, et que cette hybridation permet de réduire les contraintes opératoires exercées sur la pile, ouvrant ainsi la possibilité d'une amélioration de sa durée de vie. Ensuite, une étude expérimentale de la PEMFC fonctionnant en court-circuit a été réalisée. Après l'apparition du court-circuit, un pic de courant se produit (près de dix

fois le courant nominal) mais diminue pour se stabiliser vers une valeur beaucoup plus faible (deux fois le courant nominal), cela est dû aux pertes de concentration et à la limitation du débit d'hydrogène tel que conclu dans [28]. La tension des cellules individuelles varie et dépend des positions relatives en ce qui concerne l'entrée de gaz. Une chute de tension se produit dans toutes les cellules et même certaines d'entre elles présentent une inversion du potentiel tel que indiqué dans [67]. La température s'élève mais la dynamique des constantes de temps est plus lente que celles électriques. Il est difficile de conclure sur la dégradation, en tout cas à court terme, à partir des spectres d'impédance du fait que les résultats obtenus avant et après l'apparition du court-circuit sont très similaires. Ce pourrait être parce que les court-circuits produits ont été maintenus pendant une durée relativement courte, ou parce qu'il faut plus de temps aux défauts initiés pour se développer.

De manière générale, un des objectifs de l'hybridation est d'éviter à la PEMFC de fournir un courant élevé, ainsi que de permettre une meilleure stratégie de gestion de l'énergie entre les sources hybrides. Cependant, pour pouvoir désigner une stratégie de gestion de l'énergie fiable, il est essentiel de considérer le pire des cas de fonctionnement. Malheureusement, comme il n'est pas possible de garantir une probabilité de court-circuit à 0 % au cours de la durée de vie de la PEMFC, nous considérons intéressant d'étudier cet état indésirable. L'étude de leurs effets a été l'un des points à souligner de ce chapitre.

Chapitre 5

Conclusions et Perspectives

Ce chapitre récapitule les principales réalisations accomplies et offre les perspectives relatives à nos différentes contributions. Les approfondissements possibles de recherche ouvertes par ce travail sont nombreux, nous citerons que les pistes les plus prometteuses pour de futurs travaux, tant pour le pronostic et gestion de l'état de santé (PHM – Prognostics & Health Management) que pour l'hybridation passive des systèmes pile à combustible (FCS – Fuel Cell System) de type à “membrane échangeuse de protons” (PEM – Proton Exchange Membrane).

5.1 Discussions

Les travaux présentés dans cette thèse sont des contributions visant à l'augmentation de la durée de vie des PEM-FCS. Pour ce faire, deux solutions distincts mais complémentaires ont été explorées. Tout d'abord, nous avons mis en place les moyens logiciels pour le pronostic de la durée de vie du stack et ensuite, nous avons étudié la possibilité d'une hybridation passive avec des super-condensateurs (UC – Ultra Capacitor) de manière à lisser les contraintes demandées à la pile à combustible. À cet effet, nous pouvons récapituler comme suit :

Le premier chapitre a fourni une description de la motivation et le contexte général du sujet de recherche, mettant en évidence la problématique industrielle liée aux PEM-FCS, nous avons également présenté les objectifs et la méthodologie suivie au cours du développement du présent travail.

Ensuite, le deuxième chapitre a été consacré aux PEM-FCS ; nous avons orienté notre pro-

pos autour des défaillances, de leur hybridation et surtout, des aspects PHM. Une PEMFC a besoin d'un grand nombre d'appareils auxiliaires pour fonctionner dans des conditions favorables. Le point de fonctionnement optimal du stack souvent ne correspond pas à l'optimum du système. La forte consommation de ces auxiliaires et les effets de la dégradation des composants soumis à des contraintes sévères ont un impact négatif sur les performances globales du système. Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude des mécanismes de défaillances au niveau du système. Cela nous a permis de mettre en évidence la problématique de l'électronique de puissance comme étant une source de défaillance importante des véhicules à pile à combustible. Ces dispositifs électroniques sont en outre considérés comme un important consommateur d'énergie (rendements typiquement voisins de 90 %). Ils reposent de plus sur un grand nombre de composants électroniques semi-conducteurs. La dégradation dans ces composants conduit à diminuer l'efficacité du fonctionnement de ces convertisseurs statiques et éventuellement peut même conduire à la défaillance du système pile à combustible dans son intégralité.

Nous avons également vu, comme le PHM des PEM-FCS est à un stade de développement relativement peu avancé. Dans ce sens, nous avons présenté un aperçu des principales réalisations dans le domaine du PHM pour les PEM-FCS. Notre objectif a été de révéler les enjeux, défis et opportunités auxquels fait face la recherche actuelle en matière de développement des systèmes PHM et les opportunités associées à la durabilité des PEM-FCS.

Le troisième chapitre a été consacré à la conception et la réalisation d'un modèle de pronostic pour prédire la tendance de la dégradation d'un PEM-FCS. Nous avons introduit une méthodologie qui prend en compte les trois premières couches du cycle PHM. En utilisant une approche guidée par les données, nous avons montré comment la mesure de tension permet de prédire le comportement futur du système. L'architecture du système de prédiction a été définie en considérant non seulement la précision du système mais également son aptitude à être mis en œuvre dans une approche temps réel.

La méthode fondée sur un système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS – Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) est une approche souple et adaptative qui procure une excellente alternative pour le PHM des systèmes complexes et non linéaires, tels que les PEM-FCS. Plus précisément, une telle approche ne nécessite pas de modélisation physique et ainsi est

facile à mettre en œuvre. Cette méthode présente également une capacité à apprendre le comportement du système, ANFIS assure ainsi de bonnes performances de prédiction, tout en réduisant le temps d'apprentissage. En outre, grâce à son faible temps de calcul, cette méthode est bien adaptée pour les applications en temps réel. De plus, nous avons discuté leurs avantages ainsi que les inconvénients en termes de définition du modèle à travers une étude qui permet à l'utilisateur de choisir l'initialisation des paramètres importants du modèle de pronostic.

D'autre part, comme seconde contribution, nous avons proposé un procédé pour réduire l'erreur dans les prédictions. Nous proposons de diviser le signal en deux composantes : la tension due à un fonctionnement en mode nominal et une deuxième partie causée par des perturbations externes. L'idée principale est de transformer les données brutes en caractéristiques qui améliorent la précision des prédictions à long-terme. La pertinence de cette méthodologie a été illustrée par des essais menés sur des données expérimentales issues de deux stacks PEMFC différents. Il est à noter que les résultats de prédiction obtenus sont de bonne qualité.

Finalement, dans le quatrième chapitre, nous avons étudié le comportement électrique de l'hybridation d'une PEMFC et un ensemble d'UCs sans aucun convertisseur DC/DC. Nous avons montré les interactions entre la PEMFC et l'ensemble d'UCs via des simulations. De la même façon, un tel système a été simulé à partir d'un profil de charge issu d'une application véhiculaire. Les résultats démontrent l'intérêt de cette hybridation notamment pour réduire les contraintes sur la PEMFC. Celle-ci est même capable de gérer, sans trop de dommage, un court-circuit bref, représentatif du couplage direct sur des UCs déchargés. Les recherches actuelles sur l'hybridation sont essentiellement consacrées au développement des méthodes permettant de déterminer les architectures, les composants et les stratégies de gestion de l'énergie répondant au mieux à l'ensemble des missions assignées au véhicule. Cette thèse a apporté ainsi une contribution à l'augmentation de la durée de vie de ces systèmes à partir de l'étude théorique et par simulation lors de l'hybridation passive PEMFC/UC. Des simulations ont été réalisées pour étudier l'hybridation directe de ces sources. Nous nous sommes intéressés d'abord à la période de recharge des UCs et ensuite à l'alimentation d'une charge. Les résultats montrent que la valeur du courant transitoire fournie par la PEMFC servant à recharger les UC peut atteindre une valeur supérieure à sa valeur nominale.

En second lieu, un montage expérimental a été conçu et construit afin d'étudier l'effet dû aux courants élevés dans une PEMFC. Des essais expérimentaux ont été menés sur une PEMFC de 40 cellules afin d'identifier l'évolution de la réponse électrique, l'impact des paramètres thermiques et fluidiques qui influencent le comportement du stack lors d'un court-circuit. Aucune étude détaillée n'avait été signalée à ce jour pour la compréhension des mécanismes de dégradation de la pile dans ce mode d'opération. La valeur de courant de court-circuit imposé à un stack de type PEMFC est à notre connaissance la première expérimentation réalisée avec un tel courant (de l'ordre de 10 fois la densité de courant nominale). L'intérêt de cette étude en court-circuit réside évidemment dans son association avec des UCs, qui sont déchargés au démarrage du système. Les conséquences suite aux courts-circuits ont été évaluées à l'aide de la spectroscopie d'impédance électrochimique. Nous avons constaté une légère augmentation des résistances internes de chacune des 40 cellules, sans toutefois indiquer si cette augmentation peut être interprétée comme une dégradation de la PEMFC. L'objectif étant de mieux comprendre les phénomènes physiques rencontrés dans cette condition, ces essais n'ont pas eu vocation à être destructifs dans le sens où la campagne expérimentale reste préliminaire, et surtout, elle a été conçue et exécutée pour fournir de premiers résultats pour orienter de futurs travaux.

5.2 Perspectives et travaux futurs

La connaissance des mécanismes de dégradation subis dans le cœur de la PEMFC et ses auxiliaires est un élément clé dans le développement des techniques nécessaires pour répondre au problème du diagnostic et du pronostic. D'importants progrès ont été accomplis dans le domaine du diagnostic, cependant il faudra déployer des efforts supplémentaires dans le cadre du pronostic de défaillances et l'aide à la décision, ainsi comme le développement d'algorithmes PHM servant à consolider une approche globale du PEM-FCS, qui soit indépendante du mode de fonctionnement et qui prend en compte les effets du vieillissement se produisant à chaque instant de la vie du système. Pour cela, les mécanismes de vieillissement doivent être connus et quantifiables afin de donner les performances à la fin du cycle de vie de la pile à combustible. Un grand effort de recherche doit se poursuivre pour établir des indicateurs fiables vers une

quantification du niveau actuel de la dégradation. En outre, nous proposons de développer des méthodologies pour le pré-traitement des données, intégrant l'utilisation d'autres paramètres issus de la mesure sur une PEMFC avec pour objectif de définir une méthodologie globale pour l'estimation du temps de vie résiduel du système (RUL – Remaining Useful Lifetime) sous charge électrique dynamique.

La représentation et la gestion de l'incertitude à tous les stades du processus PHM est essentielle pour la prise de décisions réalistes. Toute erreur sera propagée dans le futur, avec une marge d'erreur élevée au fur et à mesure que l'horizon de prédiction augmente, et peut conduire, d'une part, à une maintenance préventive inutile en raison de la sous-estimation du RUL (fausses alarmes), et d'autre part, aux défaillances et même catastrophiques dans le système dues à une surestimation du RUL. Un autre problème pourrait être l'absence de connaissance sur les conditions d'exploitation futures, qui exige de gérer intelligemment la phase d'apprentissage du modèle de pronostic piloté par les données, afin d'éviter une grande incertitude dans la phase de prédiction.

La modélisation des PEM-FCS a été étudiée par plusieurs auteurs et par des approches différentes. Cependant, la plupart de ces modèles de composants/sous-systèmes n'ont pas été validés expérimentalement ou sont encore à être intégrés dans un système complet. Il existe un manque d'études rigoureuses sur l'identification des paramètres et leur association avec les métriques d'évaluation des performances. La validation et la vérification des algorithmes PHM développés est nécessaire, particulièrement la complexe interaction entre le programme et le hardware sur lequel il sera mis en œuvre.

De manière générale, un des objectifs de l'hybridation est d'éviter à la PEMFC de fournir un courant élevé, ainsi que de permettre une meilleure stratégie de gestion de l'énergie entre les sources hybrides. Cependant, pour pouvoir désigner une stratégie de gestion de l'énergie fiable, il est essentiel de considérer le pire des cas de fonctionnement. Dans cette étude, les court-circuits ont été réalisés quatre fois. Pour de plus amples recherches, il pourrait être intéressant d'imposer ces conditions plusieurs fois consécutivement et sur une durée plus longue. De même, l'étude par comparaison des spectres d'impédance avant et après le court-circuit semble montrer que la pile n'a pas subi de dommages observables immédiatement après le défaut. Néanmoins, on peut se demander si le court-circuit n'a pas pu initier des modes de dé-

térioration qui ne seront visibles qu'à plus long terme sur les performances de la pile ; une telle étude selon une approche PHM pourrait constituer un pont intéressant entre les contributions "matérielle" et "logicielle" de ce travail de thèse.

Par ailleurs, une solution envisagée pour mitiger l'impact du vieillissement liée au démarrage du système consiste à connecter les UCs avant le démarrage de la pile ; comme la PEMFC est progressivement alimentée en gaz réactifs, la tension augmente proportionnellement au débit de gaz, et le pic de courant pourra ainsi être limité. Cependant, compte tenu que même dans ce cas, un court-circuit reste possible lorsqu'on considère un défaut dans l'électronique de puissance : l'étude de leurs effets pourrait être une autre perspective intéressante de ce travail.

Bibliographie

- [1] M. El-Koujok, R. Gouriveau, and N. Zerhouni, "Reducing arbitrary choices in model building for prognostics : An approach by applying parsimony principle on an evolving neuro-fuzzy system," *Microelectronics Reliability*, vol. 51, no. 2, pp. 310–320, feb 2011. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026271410005044>
- [2] J. Sheppard, M. Kaufman, and T. Wilmer, "IEEE Standards for Prognostics and Health Management," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 24, no. 9, pp. 34–41, sep 2009. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5282287>
- [3] George, Vachtsevanos, F. L, Lewis, Michael, Roemer, Andrew, Hess, and B. Wu, *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*. Wiley Online Library, 2006.
- [4] S. M. C. Ang, E. S. Fraga, N. P. Brandon, N. J. Samsatli, and D. J. Brett, "Fuel cell systems optimisation – Methods and strategies," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 22, pp. 14 678–14 703, nov 2011. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911019720http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319911019720>
- [5] L. Zubietta and R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, 2000. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=821816>
- [6] J. Solano Martínez, "Energy management of a hybrid electric vehicle : an approach based on type-2 fuzzy logic," Ph.D. dissertation, Université de Franche-Comté, Belfort, France, 2012.
- [7] France Nature Environnement, "Mobilités de demain, se déplacer moins, mieux, autrement," 2013. [Online]. Available : fne.asso.fr
- [8] California Fuel Cell Partnership, "Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Station Deployment Plan : A Strategy for Meeting the Challenge Ahead," 2009. [Online]. Available : www.cafcp.org
- [9] S. Kundu, M. Fowler, L. Simon, and S. Grot, "Morphological features (defects) in fuel cell membrane electrode assemblies," *Journal of Power Sources*, vol. 157, no. 2, pp. 650–656, jul 2006. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305016964http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775305016964>
- [10] D. V. Ragone, "Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles," in *SAE Technical Paper 680453*, feb 1968. [Online]. Available : <http://papers.sae.org/680453/>
- [11] G. Niu, D. Lau, and M. Pecht, "Improving computer manufacturing management through Lean Six Sigma and PHM," in *2010 Prognostics and System Health Management Conference*. IEEE, jan 2010, pp. 1–7. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5413497>
- [12] A. Saxena, J. Celaya, E. Balaban, K. Goebel, B. Saha, S. Saha, and M. Schwabacher, "Metrics for evaluating performance of prognostic techniques," in *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*. IEEE, oct 2008, pp. 1–17. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4711436>
- [13] J. Banks, K. Reichard, E. Crow, and K. Nickell, "How engineers can conduct cost-benefit analysis for PHM systems," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 22–30, mar 2009. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4811085>
- [14] Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie, "Repères - Chiffres clés du transport," République Française, 2013. [Online]. Available : www.developpement-durable.gouv.fr/transports
- [15] Fuel Cell Today, "The Fuel Cell Industry Review 2013," 2013. [Online]. Available : www.fuelcelltoday.com
- [16] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, "Énergie et Climat, les chiffres clés 2012," 2012. [Online]. Available : www.ademe.fr

- [17] D. Theckedath, "Le point sur l'économie de l'hydrogène," 2010. [Online]. Available : <http://www.parl.gc.ca/>
- [18] E. A. Wargo, C. R. Dennison, and E. C. Kumbur, "Chapter 1 - Durability of Polymer Electrolyte Fuel Cells : Status and Targets," in *Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation*, M. M. Mench, E. C. Kumbur, and T. N. Veziroglu, Eds. Boston : Academic Press, 2012, pp. 1–14. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123869364100016>
- [19] W. Schmittinger and A. Vahidi, "A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 180, no. 1, pp. 1–14, 2008. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775308001924>
- [20] N. Garland, T. Benjamin, and J. Kopasz, "DOE Fuel Cell Program : Durability Technical Targets and Testing Protocols," in *ECS Transactions*, vol. 11. ECS, 2007, pp. 923–931. [Online]. Available : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-45249116376&partnerID=40&md5=ba67ce41d069afb408ee476aec5708f6><http://ecst.ecsdl.org/cgi/doi/10.1149/1.2781004>
- [21] J. Spendelow and J. Marcinkoski, "Fuel Cell System Cost - 2013," U.S. Department of Energy, Tech. Rep. 13012, 2013. [Online]. Available : http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/14012_fuel_cell_system_cost_2013.pdf
- [22] F. Urbani, O. Barbera, G. Giaccoppo, G. Squadrito, and E. Passalacqua, "Effect of operative conditions on a PEFC stack performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 12, pp. 3137–3141, jun 2008. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319907006878>
- [23] J. Wu, X. Z. Yuan, J. J. Martin, H. Wang, J. Zhang, J. Shen, S. Wu, and W. Merida, "A review of PEM fuel cell durability : Degradation mechanisms and mitigation strategies," *Journal of Power Sources*, vol. 184, no. 1, pp. 104–119, sep 2008. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775308011968><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775308011968>
- [24] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, "Les technologies de l'hydrogène au CEA," pp. 1–24, 2012. [Online]. Available : www.cea.fr/presse
- [25] A. Mohammadi, D. Guilbert, A. Gaillard, D. Bouquain, D. Khaburi, and A. Djerdir, "Faults diagnosis between PEM fuel cell and DC/DC converter using neural networks for automotive applications," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, nov 2013, pp. 8186–8191. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6700503>
- [26] B. Morin, "Hybridation d'une pile à combustible par des supercondensateurs : vers une solution passive et directe," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2013.
- [27] A. Nishizawa, J. Kallo, O. Garrot, and J. Weiss-Ungethüm, "Fuel cell and Li-ion battery direct hybridization system for aircraft applications," *Journal of Power Sources*, vol. 222, no. 0, pp. 294–300, jan 2013. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531201419X><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877531201419X>
- [28] M. Hinaje, S. Raël, J.-P. Caron, and B. Davat, "An innovating application of PEM fuel cell : Current source controlled by hydrogen supply," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 17, pp. 12 481–12 488, sep 2012. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912013365><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319912013365>
- [29] J. Bernard, M. Hofer, U. Hannesen, A. Toth, A. Tsukada, F. N. Büchi, and P. Dietrich, "Fuel cell/battery passive hybrid power source for electric powertrains," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 14, pp. 5867–5872, jul 2011. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311005970><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775311005970>
- [30] A. Kawamura, M. Pavlovsky, and Y. Tsuruta, "State-of-the-art high power density and high efficiency DC-DC chopper circuits for HEV and FCEV applications," in *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, vol. 1, no. d. IEEE, sep 2008, pp. 7–20. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4635239>
- [31] D. Gucik Derigny, "Contribution au pronostic des systèmes à base de modèles : théorie et application," Ph.D. dissertation, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 2011.
- [32] P. Ribot, "Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes," Ph.D. dissertation, Université de Toulouse, 2009.
- [33] R. Gouriveau, K. Medjaher, E. Ramasso, and N. Zerhouni, "PHM – Prognostics and health management De la surveillance au pronostic de défaillances de systèmes complexes," *Techniques de l'ingénieur Fonction stratégique de la maintenance*, vol. base docum, no. ref. article : mt9570,

2013. [Online]. Available : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/fonction-strategique-de-la-maintenance-42137210/phm-prognostics-and-health-management-mt9570/>
- [34] M. Pecht, "Prognostics and health monitoring for improved qualification," in *EuroSimE 2009 - 10th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*. IEEE, apr 2009, pp. 1–10. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4938511>
 - [35] J. Dai, D. Das, and M. Pecht, "Prognostics-based risk mitigation for telecom equipment under free air cooling conditions," *Applied Energy*, vol. 99, no. 0, pp. 423–429, nov 2012. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191200431Xhttp://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191200431X>
 - [36] T. Kurz, A. Hakenjos, J. Krämer, M. Zedda, and C. Agert, "An impedance-based predictive control strategy for the state-of-health of PEM fuel cell stacks," *Journal of Power Sources*, vol. 180, no. 2, pp. 742–747, jun 2008. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775308004515http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775308004515>
 - [37] C. Kunusch, P. Puleston, and M. Mayosky, *Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells*. Springer Verlag, 2012. [Online]. Available : http://books.google.ca/books?id=mnEVQSb_kaEC
 - [38] P. Pei and H. Chen, "Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications : A review," *Applied Energy*, vol. 125, no. 0, pp. 60–75, jul 2014. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914002797http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914002797>
 - [39] B. Singh, "Novel and Ruggedized Power Electronics for Off-Highway Vehicles," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 31–41, jun 2014. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6841733>
 - [40] H. Wang, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Toward Reliable Power Electronics : Challenges, Design Tools, and Opportunities," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 17–26, jun 2013. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6532474>
 - [41] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles : Architectures and modeling," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 2, pp. 589–598, 2010.
 - [42] H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, P. de Place Rimmen, J. B. Jacobsen, T. Kvisgaard, and J. Landkildehus, "Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 97–114, mar 2014. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6661372>
 - [43] H. Wang, D. Zhou, and F. Blaabjerg, "A reliability-oriented design method for power electronic converters," in *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, mar 2013, pp. 2921–2928. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6520713>
 - [44] B. Yao, H. Chen, X.-Q. He, Q.-Z. Xiao, and X.-J. Kuang, "Reliability and failure analysis of DC/DC converter and case studies," in *2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*. IEEE, jul 2013, pp. 1133–1135. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6625766>
 - [45] A. Bryant, P. Mawby, and P. Tavner, "An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, may 2011. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5729810>
 - [46] C. Kulkarni, G. Biswas, X. Koutsoukos, J. Celaya, and K. Goebel, "Integrated diagnostic/prognostic experimental setup for capacitor degradation and health monitoring," in *2010 IEEE AUTOTESTCON*. IEEE, sep 2010, pp. 1–7. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=5613596>
 - [47] D. Guilbert, A. Gaillard, A. Mohammadi, A. N'Diaye, and A. Djerdir, "Investigation of the interactions between proton exchange membrane fuel cell and interleaved DC/DC boost converter in case of power switch faults," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 519–537, jan 2015. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914029127>
 - [48] Y. Song and B. Wang, "Survey on Reliability of Power Electronic Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 591–604, jan 2013. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6176239>

- [49] D. Feroldi and M. Basualdo, *PEM Fuel Cells with Bio-Ethanol Processor Systems*, ser. Green Energy and Technology, M. S. Basualdo, D. Feroldi, and R. Outbib, Eds. London : Springer London, 2012, vol. 87. [Online]. Available : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84883618353&partnerID=tZOtx3y1http://link.springer.com/10.1007/978-1-84996-184-4>
- [50] S. S. Williamson, A. K. Rathore, and F. Musavi, "Industrial Electronics for Electric Transportation : Current State-of-the-Art and Future Challenges," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 3021–3032, may 2015. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7055312>
- [51] S. C. Lee, O. Kwon, S. Thomas, S. Park, and G.-H. Choi, "Graphical and mathematical analysis of fuel cell/battery passive hybridization with K factors," *Applied Energy*, vol. 114, no. 0, pp. 135–145, feb 2014. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913008003http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261913008003>
- [52] M. Grötsch, M. Mangold, and A. Kienle, "Analysis of the coupling behavior of PEM fuel cells and DC-DC converters," *Energies*, vol. 2, no. 1, pp. 71–96, 2009.
- [53] T. D. Batzel and D. C. Swanson, "Prognostic Health Management of Aircraft Power Generators," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 2, pp. 473–482, apr 2009. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5089535>
- [54] P. P. Banerjee, R. Ávila, D. He, S. Wu, and E. Bechhoefer, "Discriminant Analysis Based Prognostics of Avionic Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, pp. 1318–1326, nov 2007. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4343982>
- [55] P. Lall, R. Lowe, and K. Goebel, "Prognostics Health Management of Electronic Systems Under Mechanical Shock and Vibration Using Kalman Filter Models and Metrics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, pp. 4301–4314, nov 2012. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6135786>
- [56] P. Lall, M. Hande, C. Bhat, and J. Lee, "Prognostics Health Monitoring (PHM) for Prior Damage Assessment in Electronics Equipment Under Thermo-Mechanical Loads," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 1, no. 11, pp. 1774–1789, nov 2011. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4250020http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6026229>
- [57] M. Musallam and C. M. Johnson, "Real-Time Compact Thermal Models for Health Management of Power Electronics," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1416–1425, jun 2010. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5411764>
- [58] N. Vichare and M. Pecht, "Prognostics and health management of electronics," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 29, no. 1, pp. 222–229, mar 2006. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1599514>
- [59] E. G. Strangas, S. Aviyente, J. D. Neely, and S. S. H. Zaidi, "The Effect of Failure Prognosis and Mitigation on the Reliability of Permanent-Magnet AC Motor Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 3519–3528, aug 2013. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6355667>
- [60] P. Ramuhalli, J. Coble, R. M. Meyer, and L. J. Bond, "Prognostics health management and life beyond 60 for nuclear power plants," in *2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings*. IEEE, oct 2012, pp. 1–4. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6378350>
- [61] D. Riley and J. Johnson, "Photovoltaic prognostics and heath management using learning algorithms," in *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. IEEE, jun 2012, pp. 001 535–001 539. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6317887>
- [62] P. Baraldi, F. Mangili, and E. Zio, "A Kalman Filter-Based Ensemble Approach With Application to Turbine Creep Prognostics," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, no. 4, pp. 966–977, dec 2012. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6328298>
- [63] J. Demo, C. Andrews, F. Friedersdorf, and M. Putic, "Diagnostics and prognostics for aircraft structures using a wireless corrosion monitoring network," in *2011 Aerospace Conference*. IEEE, mar 2011, pp. 1–10. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5747598>
- [64] M. Kobayshi and Q. Yu, "Reliability evaluation for specify factor of fatigue on power device," in *2010 Prognostics and System Health Management Conference*, no. 3. IEEE, jan 2010, pp. 1–6. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5414564>

- [65] L. Garg, S. I. McClean, M. Barton, B. J. Meenan, and K. Fullerton, "Intelligent Patient Management and Resource Planning for Complex, Heterogeneous, and Stochastic Healthcare Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans*, vol. 42, no. 6, pp. 1332–1345, nov 2012. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6330032>
- [66] C. a. Frantzidis, C. Bratsas, M. a. Klados, E. Konstantinidis, C. D. Lithari, A. B. Vivas, C. L. Papadelis, E. Kaldoudi, C. Pappas, and P. D. Bamidis, "On the classification of emotional biosignals evoked while viewing affective pictures : an integrated data-mining-based approach for healthcare applications." *IEEE transactions on information technology in biomedicine : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 14, no. 2, pp. 309–18, mar 2010. [Online]. Available : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20064762>
- [67] M. M. Mench, E. C. Kumbur, and T. N. Veziroglu, *Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation*. Elsevier Science, 2011.
- [68] H. Oh, M. H. Azarian, M. Pecht, C. H. White, R. C. Sohaney, and E. Rhem, "Physics-of-failure approach for fan PHM in electronics applications," in *2010 Prognostics and System Health Management Conference*. IEEE, jan 2010, pp. 1–6. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5413501>
- [69] R. Borup, J. Meyers, B. Pivovar, Y. S. Kim, R. Mukundan, N. Garland, D. Myers, M. Wilson, F. Garzon, D. Wood, P. Zelenay, K. More, K. Stroh, T. Zawodzinski, J. Boncella, J. E. McGrath, M. Inaba, K. Miyatake, M. Hori, K. Ota, Z. Ogumi, S. Miyata, A. Nishikata, Z. Siroma, Y. Uchimoto, K. Yasuda, K.-i. Kimijima, and N. Iwashita, "Scientific Aspects of Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability and Degradation," *Chemical Reviews*, vol. 107, no. 10, pp. 3904–3951, 2007. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1021/cr050182l>
- [70] X. Cheng, Z. Shi, N. Glass, L. Zhang, J. Zhang, D. Song, Z.-S. Liu, H. Wang, and J. Shen, "A review of PEM hydrogen fuel cell contamination : Impacts, mechanisms, and mitigation," *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 739–756, mar 2007. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775306025304><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775306025304>
- [71] X. Yan, M. Hou, L. Sun, H. Cheng, Y. Hong, D. Liang, Q. Shen, P. Ming, and B. Yi, "The study on transient characteristic of proton exchange membrane fuel cell stack during dynamic loading," *Journal of Power Sources*, vol. 163, no. 2, pp. 966–970, jan 2007. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775306020519><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775306020519>
- [72] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, A. Hernandez, and A. Aslanides, "A review on PEM voltage degradation associated with water management : Impacts, influent factors and characterization," *Journal of Power Sources*, vol. 183, no. 1, pp. 260–274, aug 2008. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775308007337><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775308007337>
- [73] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, and D. Hissel, "A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues : Causes, consequences and diagnostic for mitigation," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 130–145, oct 2009. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309005655><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775309005655>
- [74] Y. Yu, H. Li, H. Wang, X.-Z. Yuan, G. Wang, and M. Pan, "A review on performance degradation of proton exchange membrane fuel cells during startup and shutdown processes : Causes, consequences, and mitigation strategies," *Journal of Power Sources*, vol. 205, no. 0, pp. 10–23, may 2012. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312001024><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775312001024>
- [75] J. Wu, X.-Z. Yuan, J. J. Martin, H. Wang, D. Yang, J. Qiao, and J. Ma, "Proton exchange membrane fuel cell degradation under close to open-circuit conditions : Part I : In situ diagnosis," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 4, pp. 1171–1176, 2010. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309015390>
- [76] X.-Z. Yuan, S. Zhang, S. Ban, C. Huang, H. Wang, V. Singara, M. Fowler, M. Schulze, A. Haug, K. Andreas Friedrich, and R. Hiesgen, "Degradation of a PEM fuel cell stack with Nafion® membranes of different thicknesses. Part II : Ex situ diagnosis," *Journal of Power Sources*, vol. 205, pp. 324–334, may 2012. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775312001735>
- [77] S. Mu, P. Zhao, C. Xu, Y. Gao, and M. Pan, "Detaching behaviors of catalyst layers applied in PEM fuel cells by off-line accelerated test," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 15, pp. 8155–8160, aug 2010. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909021417><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319909021417>

- [78] S. Kundu, M. Fowler, L. C. Simon, and R. Abouatallah, "Reversible and irreversible degradation in fuel cells during Open Circuit Voltage durability testing," *Journal of Power Sources*, vol. 182, no. 1, pp. 254–258, jul 2008. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775308007179><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775308007179>
- [79] S. J. Bae, S.-J. Kim, J. I. Park, C. W. Park, J.-H. Lee, I. Song, N. Lee, K.-B. Kim, and J.-Y. Park, "Lifetime prediction of a polymer electrolyte membrane fuel cell via an accelerated startup–shutdown cycle test," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 12, pp. 9775–9781, jun 2012. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912007525><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319912007525>
- [80] P. Pei, Q. Chang, and T. Tang, "A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 14, pp. 3829–3836, jul 2008. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990800476X><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031990800476X>
- [81] A. S. Maxwell, W. R. Broughton, G. D. Dean, and A. S. Sims, "Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials," National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, Tech. Rep., 2005.
- [82] G. Bucci, F. Ciancetta, and E. Fiorucci, "An automatic test system for the dynamic characterization of PEM fuel cells," in *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510)*, vol. 1. IEEE, 2004, pp. 675–680. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1351137>
- [83] X.-Z. Yuan, H. Li, S. Zhang, J. Martin, and H. Wang, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability test protocols," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 22, pp. 9107–9116, nov 2011. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311014947><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775311014947>
- [84] S. A. E. T. Standards, "J 2615 - Performance Test Procedures of Fuel Cell Systems For Automotive Applications," 2005. [Online]. Available : <http://www.fuelcellstandards.com/>
- [85] S. Zhang, X. Yuan, H. Wang, W. Merida, H. Zhu, J. Shen, S. Wu, and J. Zhang, "A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 388–404, jan 2009. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908013591><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319908013591>
- [86] S. Dhanushkodi, M. Tam, S. Kundu, M. Fowler, and M. Pritzker, "Carbon corrosion fingerprint development and de-convolution of performance loss according to degradation mechanism in PEM fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 240, no. 0, pp. 114–121, oct 2013. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313004242><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775313004242>
- [87] M. Gašperin, P. Boškoski, A. Debenjak, and J. Petrovčič, "Signal Processing and Stochastic Filtering for EIS Based PHM of Fuel Cell Systems," *Fuel Cells*, vol. 14, no. 3, pp. 457–465, jun 2014. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1002/fuce.201300217><http://doi.wiley.com/10.1002/fuce.201300217>
- [88] Z. Li, R. Outbib, D. Hissel, and S. Giurgea, "Data-driven diagnosis of PEM fuel cell : A comparative study," *Control Engineering Practice*, vol. 28, no. 0, pp. 1–12, jul 2014. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066114001002><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066114001002>
- [89] N. Y. Steiner, D. Hissel, P. Moçotéguy, and D. Candusso, "Non intrusive diagnosis of polymer electrolyte fuel cells by wavelet packet transform," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 740–746, jan 2011. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910021129><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910021129>
- [90] M. Lebold and M. Thurston, "Open standards for Condition-Based Maintenance and Prognostic Systems," in *5th Annual Maintenance and Reliability Conference*, Gatlinburg, USA, 2001.
- [91] C. Chen, G. Vachtsevanos, and M. E. Orchard, "Machine remaining useful life prediction : An integrated adaptive neuro-fuzzy and high-order particle filtering approach," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 28, pp. 597–607, apr 2012. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327011004067>
- [92] A. K. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, oct 2006. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327005001512>

- [93] X. Zhang and P. Pisu, "An Unscented Kalman Filter Based Approach for the Health- Monitoring and Prognostics of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell," in *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2012*, Minneapolis, 2012, pp. 1–9.
- [94] M. Jouin, R. Gouriveau, D. Hissel, M.-C. Péra, and N. Zerhouni, "Prognostics and Health Management of PEMFC – State of the art and remaining challenges," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 35, pp. 15 307–15 317, nov 2013. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031991302274X>
- [95] —, "Prognostics of PEM fuel cell in a particle filtering framework," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 481–494, jan 2014. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913025275><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319913025275>
- [96] S. Morando, S. Jemei, R. Gouriveau, N. Zerhouni, and D. Hissel, "Fuel Cells prognostics using echo state network," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, nov 2013, pp. 1632–1637. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6699377>
- [97] J. J. Winebrake and B. P. Creswick, "The future of hydrogen fueling systems for transportation," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 70, no. 4, pp. 359–384, may 2003. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162501001895><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162501001895>
- [98] X. Zhang, C. Ding, and T. Zhang, "A hierarchical model for automotive PEM fuel cell system comprehensive evaluation and comparison," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 3, pp. 1476–1484, jan 2014. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913027390><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319913027390>
- [99] C. Wang, M. Nehrir, and S. Shaw, "Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 442–451, jun 2005. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1432859>
- [100] N. Wagner, "Characterization of membrane electrode assemblies in polymer electrolyte fuel cells using a.c. impedance spectroscopy," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 32, no. 8, pp. 859–863, 2002. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020551609230>
- [101] S. V. Puranik, A. Keyhani, and F. Khorrami, "State-Space Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 804–813, sep 2010. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5499038>
- [102] F. Grasser and A. Rufer, "A Fully Analytical PEM Fuel Cell System Model for Control Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 6, pp. 1499–1506, 2007. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4384992>
- [103] A. Hernandez, D. Hissel, and R. Outbib, "Non Linear State Space Modelling of a PEMFC," *Fuel Cells*, vol. 6, no. 1, pp. 38–46, feb 2006. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1002/fuce.200500102><http://doi.wiley.com/10.1002/fuce.200500102>
- [104] L. Boulon, K. Agbossou, D. Hissel, P. Sicard, A. Bouscayrol, and M.-C. Péra, "A macroscopic PEM fuel cell model including water phenomena for vehicle simulation," *Renewable Energy*, vol. 46, no. 0, pp. 81–91, oct 2012. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112001954><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148112001954>
- [105] L. Boulon, K. Agbossou, D. Hissel, A. Bouscayrol, P. Sicard, A. Hernandez, and M.-C. Pera, "Macroscopic modeling and representation of a PEM fuel cell gas supply taking into account the water phenomena," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, sep 2010, pp. 1–6. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5729061>
- [106] E. Lechartier, R. Gouriveau, M.-C. Pera, D. Hissel, and N. Zerhouni, "Static and Dynamic Modeling of a PEMFC for Prognostics Purpose," in *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, oct 2014, pp. 1–5. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7007136>
- [107] B. Sun, S. Zeng, R. Kang, and M. G. Pecht, "Benefits and Challenges of System Prognostics," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, no. 2, pp. 323–335, jun 2012. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6191342>
- [108] X.-S. Si, W. Wang, C.-H. Hu, and D.-H. Zhou, "Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches," *European Journal of Operational Research*, vol. 213, no. 1, pp. 1–14, aug 2011. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03772221710007903><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S03772221710007903>

- [109] R. Gouriveau and E. Ramasso, "From real data to Remaining Useful Life estimation : an approach combining neuro-fuzzy predictions and evidential Markovian classifications A data-driven prognostics approach," in *Proceedings of the 38th ESReDA Seminar Advanced Maintenance Modelling*, 2010, pp. 1–13.
- [110] N. Yousfi Steiner, D. Hissel, P. Moçotéguy, and D. Candusso, "Diagnosis of polymer electrolyte fuel cells failure modes (flooding & drying out) by neural networks modeling," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3067–3075, feb 2011. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910021853><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910021853>
- [111] S. Jemei, D. Hissel, M. Péra, and J. Kauffmann, "On-board fuel cell power supply modeling on the basis of neural network methodology," *Journal of Power Sources*, vol. 124, no. 2, pp. 479–486, nov 2003. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775303007997>
- [112] C. Fennie, J. Reisner, J. Barbetta, and P. Singh, "Fuzzy Logic-Based State of Health Determination of PEM Fuel Cells," in *EVS-18*, Berlin, Germany, 2001.
- [113] Y. Vural, D. B. Ingham, and M. Pourkashanian, "Performance prediction of a proton exchange membrane fuel cell using the ANFIS model," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 22, pp. 9181–9187, nov 2009. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319909013482>
- [114] S. U. N. Tao, Y. A. N. Si-jia, Z. H. U. Xin-jian, I. With, and C. Guang-yi, "Modelling and control PEMFC using fuzzy neural networks," *Journal of Zhejiang University Science A*, vol. 6, no. 10, pp. 1084–1089, 2005. [Online]. Available : <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBBF02842230>
- [115] A. Saxena, J. Celaya, B. Saha, S. Saha, and K. Goebe, "Metrics for Offline Evaluation of Prognostic Performance ," *International Journal of Prognostics and Health Management (IJPHM)*, vol. 1, no. 001, 2010.
- [116] A. Saxena, J. Celaya, B. Saha, S. Saha, and K. Goebel, "Evaluating algorithm performance metrics tailored for prognostics," in *2009 IEEE Aerospace conference*. IEEE, mar 2009, pp. 1–13. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4839666>
- [117] S. Uckun, K. Goebel, and P. J. F. Lucas, "Standardizing research methods for prognostics," in *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*. IEEE, oct 2008, pp. 1–10. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4711437>
- [118] S. Kunche, C. Chen, and M. Pecht, "A review of PHM system's architectural frameworks," *The 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, Dayton, OH, 2012.
- [119] a. Hess, G. Calvello, P. Frith, S. Engel, and D. Hoitsma, "Challenges, Issues, and Lessons Learned Chasing the " Big P" : Real Predictive Prognostics Part 2," in *2006 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2005, pp. 1–19. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1559666><http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1656124>
- [120] X.-J. Wu, X.-J. Zhu, G.-Y. Cao, and H.-Y. Tu, "Nonlinear modeling of a SOFC stack based on ANFIS identification," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, no. 4, pp. 399–409, apr 2008. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1569190X08000117>
- [121] X. Gao and S. Ovaska, "Soft computing methods in motor fault diagnosis," *Applied Soft Computing*, vol. 1, no. 1, pp. 73–81, jun 2001. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1568494601000084>
- [122] D. Nauck and R. Kruse, "Obtaining interpretable fuzzy classification rules from medical data," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 16, no. 2, pp. 149–169, jun 1999. [Online]. Available : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10378442><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0933365798000700>
- [123] Dilshad Begum, K. M. Ravikumar, James. Mathew, Sanjeev Kubakaddi, Rajeev Yadav, D. Begum, K. M. Ravikumar, J. Mathew, S. Kubakaddi, and R. Yadav, "EEG Based Patient Monitoring System for Mental Alertness Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach," *Journal of Medical and Bioengineering*, vol. 4, no. 1, pp. 59–66, feb 2015. [Online]. Available : http://www.researchgate.net/publication/260943523_EEG_Based_Patient_Monitoring_System_for_Mental_Alertness_Using_Adaptive_Neuro-Fuzzy_Approach
- [124] V. S. Chourasia, A. K. Tiwari, and R. Gangopadhyay, "A novel approach for phonocardiographic signals processing to make possible fetal heart rate evaluations," *Digital Signal Processing*, vol. 30, no. 0, pp. 165–183, jul 2014. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S105120041400102X><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S105120041400102X>
- [125] M. Forouzanfar, H. R. Dajani, V. Z. Groza, M. Bolic, and S. Rajan, "Feature-Based Neural Network Approach for Oscillometric Blood Pressure Estimation," *IEEE Transactions on*

- Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 8, pp. 2786–2796, aug 2011. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5740350>
- [126] Changliang Xia, Chen Guo, and Tingna Shi, “A Neural-Network-Identifier and Fuzzy-Controller-Based Algorithm for Dynamic Decoupling Control of Permanent-Magnet Spherical Motor,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2868–2878, aug 2010. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5332328>
 - [127] M. Awadallah and M. Morcos, “Automatic Diagnosis and Location of Open-Switch Fault in Brushless DC Motor Drives Using Wavelets and Neuro-Fuzzy Systems,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 104–111, mar 2006. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1597326>
 - [128] P. Grabowski, M. Kazmierkowski, B. Bose, and F. Blaabjerg, “A simple direct-torque neuro-fuzzy control of PWM-inverter-fed induction motor drive,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 4, pp. 863–870, 2000. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=857966>
 - [129] C.-T. Li, S.-J. Wu, and W.-L. Yu, “Parameter design on the multi-objectives of PEM fuel cell stack using an adaptive neuro-fuzzy inference system and genetic algorithms,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 9, pp. 4502–4515, 2014. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914000846>
 - [130] H. Tamura and C. Vairappan, “Recurrent type ANFIS using local search technique for time series prediction,” *APCCAS 2008 - 2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, pp. 380–383, nov 2008. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4746039>
 - [131] J. Zhang, H. Shu-Hung Chung, and Wai-Lun Lo, “Chaotic Time Series Prediction Using a Neuro-Fuzzy System with Time-Delay Coordinates,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 20, no. 7, pp. 956–964, jul 2008. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4445673>
 - [132] J.-S. Jang and C.-T. Sun, “Predicting chaotic time series with fuzzy if-then rules,” in *[Proceedings 1993] Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, no. 90. IEEE, 1993, pp. 1079–1084. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=327364>
 - [133] A. Kusiak, H. Zheng, and Z. Song, “Short-Term Prediction of Wind Farm Power : A Data Mining Approach,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 125–136, mar 2009. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4749292>
 - [134] C. Potter and M. Negnevitsky, “Very Short-Term Wind Forecasting for Tasmanian Power Generation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 965–972, may 2006. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1626404>
 - [135] P. García, C. A. García, L. M. Fernández, F. Llorens, and F. Jurado, “ANFIS-Based control of a grid-connected hybrid system integrating renewable energies, hydrogen and batteries,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1107–1117, 2014.
 - [136] R. Gouriveau, N. Zerhouni, and M. E. Koujok, “Towards a Neuro-Fuzzy System for time series forecasting in Maintenance Applications.” *17th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC’08.*, vol. sur CD ROM, no. section 2, p. 6, 2008. [Online]. Available : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00298361>
 - [137] D. Kim and C. Kim, “Forecasting time series with genetic fuzzy predictor ensemble,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 523–535, 1997. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=649903>
 - [138] J.-S. Jang, “ANFIS : adaptive-network-based fuzzy inference system,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=256541>
 - [139] M. Gerard, J.-P. Poirot-Crouvezier, D. Hissel, and M.-C. Pera, “Ripple Current Effects on PEMFC Aging Test by Experimental and Modeling,” *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 8, no. 2, p. 021004, 2011. [Online]. Available : <http://fuelcellscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1472273>
 - [140] M. Razani, A. Yazdani-Chamzini, and S. H. Yakhchali, “A novel fuzzy inference system for predicting roof fall rate in underground coal mines,” *Safety Science*, vol. 55, pp. 26–33, jun 2013. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925753512002731>

- [141] H. Duzen and H. Aydin, "Sunshine-based estimation of global solar radiation on horizontal surface at Lake Van region (Turkey)," *Energy Conversion and Management*, vol. 58, no. 0, pp. 35–46, jun 2012. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041200009Xhttp://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019689041200009X>
- [142] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, and L. Guzzella, "Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle," *Control Engineering Practice*, vol. 13, no. 1, pp. 41–53, jan 2005. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066103002910http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066103002910>
- [143] N. Bizon, "Fuel Cell Hybrid Power Source that operates efficiently under dynamic loads," in *Applied Electronics (AE), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 21–24.
- [144] J. Junbo, W. Gucheng, C. Yew Thean, W. Youyi, and H. Ming, "Electrical Characteristic Study of a Hybrid PEMFC and Ultracapacitor System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 6, pp. 1945–1953, jun 2010. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4926179>
- [145] O. Erdinc, B. Vural, M. Uzunoglu, and Y. Ates, "Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a wavelet-fuzzy logic based load sharing and control algorithm," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 5223–5233, jun 2009. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908013943http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319908013943>
- [146] M. Uzunoglu and M. Alam, "Dynamic modeling, design and simulation of a PEM fuel cell/ultracapacitor hybrid system for vehicular applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 5, pp. 1544–1553, may 2007. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406003633http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890406003633>
- [147] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, no. 0, pp. 82–102, apr 2013. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006910http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112006910>
- [148] M. Garcia-Arregui, C. Turpin, and S. Astier, "Direct connection between a fuel cell and ultracapacitors," in *2007 International Conference on Clean Electrical Power*. IEEE, may 2007, pp. 474–479. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4272428>
- [149] A. Boucherit, "Conception d'un convertisseur de puissance pour véhicules électriques multi-sources," Ph.D. dissertation, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, dec 2011. [Online]. Available : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00823565/>
- [150] H. Zhao and A. F. Burke, "Fuel Cell Powered Vehicles Using Supercapacitors-Device Characteristics, Control Strategies, and Simulation Results," *Fuel Cells*, vol. 10, no. 5, pp. 879–896, oct 2010. [Online]. Available : <http://doi.wiley.com/10.1002/fuce.200900214>
- [151] M. Hinaje, "A proton exchange membrane fuel cell running as a regulated current source," in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Chicago, USA : IEEE, sep 2011, pp. 1–6. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6042987>
- [152] T. Yalcinoz and M. Alam, "Improved dynamic performance of hybrid PEM fuel cells and ultracapacitors for portable applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1932–1940, apr 2008. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990800075Xhttp://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031990800075X>
- [153] S. Wasterlain, D. Candusso, D. Hissel, F. Harel, P. Bergman, P. Menard, and M. Anwar, "Study of temperature, air dew point temperature and reactant flow effects on proton exchange membrane fuel cell performances using electrochemical spectroscopy and voltammetry techniques," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 4, pp. 984–993, feb 2010. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309015249http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775309015249>
- [154] J. Solano, D. Hissel, and M.-C. Pera, "Modeling and Parameter Identification of Ultracapacitors for Hybrid Electrical Vehicles," in *2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Beijing, China : IEEE, oct 2013, pp. 1–4. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6671692>
- [155] Y. Diab, P. Venet, and G. Rojat, "Comparison of the Different Circuits Used for Balancing the Voltage of Supercapacitors : Studying Performance and Lifetime of Supercapacitors," in *Proc. 2nd Eur. Symp. Super Capacitors Appl.*, vol. 1, Lausanne, Switzerland, 2006.

- [156] D. Linzen, S. Buller, E. Karden, and R. DeDoncker, "Analysis and Evaluation of Charge-Balancing Circuits on Performance, Reliability, and Lifetime of Supercapacitor Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1135–1141, sep 2005. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1510810>
- [157] P. Barrade, S. Pittet, and A. Rufer, "Energy storage system using a series connection of supercapacitors, with an active device for equalizing the voltages," Tokyo, Japan, 2000. [Online]. Available : <http://infoscience.epfl.ch/record/59960>
- [158] D. Candusso, F. Harel, A. Debernardinis, X. Francois, M. Pera, D. Hissel, P. Schott, G. Coquery, and J. Kauffmann, "Characterisation and modelling of a 5kW PEMFC for transportation applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 8, pp. 1019–1030, jul 2006. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905003423><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319905003423>
- [159] S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, D. Hissel, and X. François, "Development of new test instruments and protocols for the diagnostic of fuel cell stacks," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 12, pp. 5325–5333, jun 2011. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775310013479><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775310013479>
- [160] M. Gerard, J.-P. Poirot-Crouvezier, D. Hissel, and M.-C. Pera, "Oxygen starvation analysis during air feeding faults in PEMFC," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 22, pp. 12 295–12 307, nov 2010. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910016356><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910016356>
- [161] M. J. Khan and M. T. Iqbal, "Modelling and Analysis of Electro-chemical, Thermal, and Reactant Flow Dynamics for a PEM Fuel Cell System," *Fuel Cells*, vol. 5, no. 4, pp. 463–475, dec 2005. [Online]. Available : <http://doi.wiley.com/10.1002/face.200400072><http://dx.doi.org/10.1002/face.200400072>
- [162] G. Tian, S. Wasterlain, I. Endichi, D. Candusso, F. Harel, X. François, M.-C. Péra, D. Hissel, and J.-M. Kauffmann, "Diagnosis methods dedicated to the localisation of failed cells within PEMFC stacks," *Journal of Power Sources*, vol. 182, no. 2, pp. 449–461, aug 2008. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775307027061><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775307027061>
- [163] A. Collier, H. Wang, X. Ziyuan, J. Zhang, and D. Wilkinson, "Degradation of polymer electrolyte membranes," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 13, pp. 1838–1854, oct 2006. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319906001674><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319906001674>
- [164] W. Friede, "Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM," Ph.D. dissertation, Institute National Polytechnique de Lorraine, 2003.
- [165] H. Wang, H. Li, and X. Yuan, *PEM Fuel Cell Durability Handbook*. Taylor & Francis Group, 2011.
- [166] L. Boulon, "Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie," Ph.D. dissertation, Université de Franche Comté, 2009. [Online]. Available : http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/theses/Boulon_These_Publique.pdf
- [167] A. Bouscayrol, "Formalismes de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs," Ph.D. dissertation, HDR de l'Université de Sciences et Technologies de Lille, 2003. [Online]. Available : <http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/theses/AlainBouscayrol.pdf>

Annexe A

Modèle de la pile à combustible

Le modèle de la pile à combustible (FC – Fuel Cell) utilisé dans le quatrième chapitre, s’inscrit dans la continuité des travaux réalisés au sein de l’Institut FEMTO-ST et présenté dans [6, 166]. Les éléments conformant le système pile à combustible (FCS – Fuel Cell System) de type à “membrane échangeuse de protons” (PEM – Proton Exchange Membrane) ont été modélisés en utilisant la technique de la représentation énergétique macroscopique (EMR – Energetic Macroscopic Representation). Ce formalisme a été développé au Laboratoire d’Électrotechnique et d’Électronique de Puissance (L2EP) à l’Université de Lille, en France, afin de faciliter l’étude des systèmes électromécaniques comme des machines électriques ou des véhicules hybrides électriques [167]. L’EMR est un outil graphique qui permet une analyse systématique des interactions et les échanges énergétiques existantes entre les différentes composants/sous-systèmes d’un système multi-physique. Le formalisme de l’EMR est développé autour de trois principes de base [167] : (i) le principe de cause à effet (qui gère les relations internes des éléments) ; (ii) le principe d’interaction (qui gère les relations externes entre éléments) ; et le principe de répartition (qui gère les distributions énergétiques via des éléments de couplage). L’intérêt de l’EMR réside dans une extension appelée structure maximale de commande qui permet une structuration systématique de contrôle basée sur un modèle d’inversion. Les divers éléments du système et son interaction sont représentés graphiquement par des pictogrammes spécifiques reliés par des flèches, comme illustré dans la Figure A.1.

Les trois parties principales de l’EMR du PEM-FCS représentent les réactions anode-

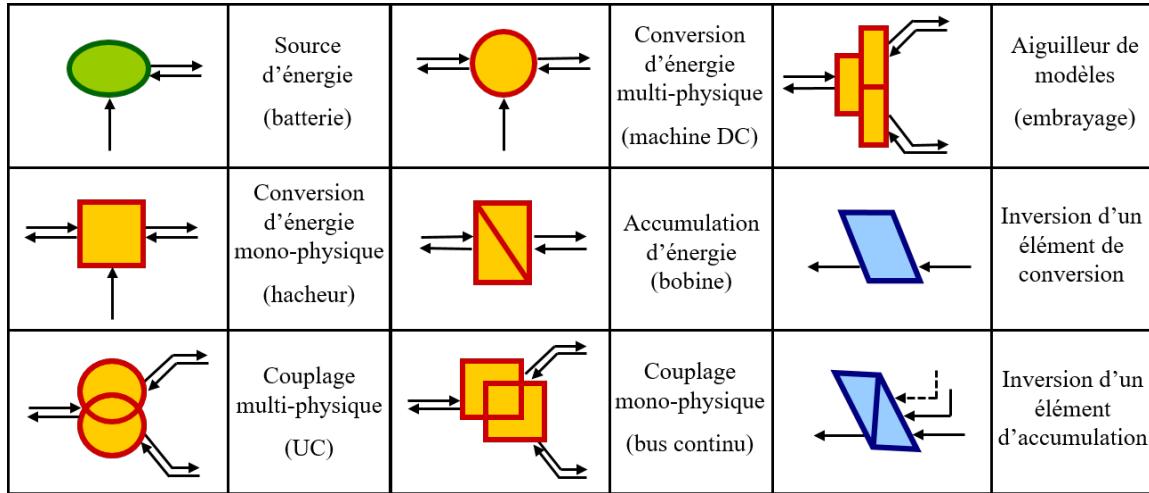


Figure A.1 – Éléments constitutifs du formalisme EMR [6]

cathode, les réactions électrochimiques et la partie thermodynamique. Les équations régissant le modèle sont présentées dans le Tableau A.1, où $\Delta\bar{G}_f$ est l'énergie libre de Gibbs dégagé ; A_{cd} et B_{cd} sont les coefficients du potentiel de Nernst ; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \nu$ sont des coefficients empiriques ; A et B sont des coefficients de surtension ; I_l est le courant limite en Ampères ; I_n est le courant interne ; V_c est la partie dynamique de la tension de cellule en Volts.

Modèle électrochimique

La partie électrochimique représente les réactions qui se produisent dans la pile. E^0 étant un potentiel purement théorique, représentatif de la puissance chimique fournie à la pile par l'hydrogène divisée par le courant I_{FC} . Dans cette approche, ce potentiel est supposé constant $\frac{\Delta h}{2F} = 1.48$ V. E^{00} est classiquement appelé "potentiel réversible de cellule" et se lie à la notion d'énergie libre de Gibbs sous des conditions standards de pressions et de températures (A.1). Cette chute de tension représente la puissance nécessairement consommée par la pile afin d'établir une tension à ses bornes (et ce, même à courant I_{FC} nul). D'un point de vue thermodynamique, ce potentiel représente le maximum théorique atteignable. Ce potentiel est une constante de l'ordre de 1.23 V (encore une fois avec des pressions et températures dans les conditions standards). E^{00} se trouve ainsi modifié afin d'obtenir le potentiel de Nernst E_N qui, de fait, se trouve proche de la tension à vide de la pile dans des conditions réelles. La différence entre E^{00} et E_N est ici subdivisée en deux parties, l'une représentant une correction

de E^{00} au niveau des pressions ΔE_P (A.2) et l'autre, une correction de E^{00} au niveau de la température ΔE_T (A.3).

Le potentiel de Nernst est affecté par plusieurs irréversibilités telles que : (i) les surtensions d'activation qui résultent de pertes liées au déclenchement des réactions électrochimiques. Leur activation conduit à une perte d'énergie et à une réduction du potentiel de Nernst. Cette chute de tension est modélisée via une loi de Tafel (A.5). Où A est un coefficient de surtension ; (ii) les surtensions de concentration sont également appelées pertes par transport de masse et sont causées par une variation de concentration des réactifs. Elles mènent à des difficultés d'acheminement des gaz et ainsi, la quantité de réactifs présente au niveau des électrodes ne permet pas de fournir la puissance requise (A.6). Où B est un coefficient de surtension et I_l le courant limite ; et (iii) les pertes ohmiques sont principalement causées par la résistance protonique de la membrane à laquelle vient s'ajouter la résistance électronique des plaques collectrices, bipolaires et des connexions. Elles sont modélisées par une simple résistance électrique R_m (A.7). Une partie électrique modélise les effets capacitifs de la PEMFC (A.8), attribuable au phénomène de charge double couche. La fonction de transfert d'un circuit $R_t C_{dl}$ représente l'impédance de nature capacitive du stack (A.8). Au sein du stack, les cellules sont connectées en série et donc la tension de stack V_{FC} est formée par le produit de la tension de cellule et du nombre de cellules N_{cellFC} .

Modèle thermique

Cette partie est constituée par les phénomènes liés à la potentielle thermodynamique de la pile. ΔS_{qEC} en $W \cdot K^{-1}$ est le flux d'entropie due à la réaction électrochimique exothermique ; ΔS_{qH_2} et ΔS_{qO_2} correspond au flux d'énergie qui circule entre le gaz et la pile. L'élément d'accumulation fixe est la température T_{FC} (A.13) est constitué une entrée. La variable de réaction est le flux d'entropie ΔS_{q0} . La notion de flux d'entropie est introduite dans le but de respecter les règles de l'EMR qui imposent d'avoir la variable d'action et de réaction conforme à une puissance en Watts. Le couplage mono physique (thermique) assurant la sommation des flux d'entropie en vue de leur traitement postérieur. Le flux d'entropie est défini comme le produit d'une variation d'entropie par un débit molaire. Par conséquence, le flux d'entropie est le produit de la variation d'entropie au moment de la création d'une mole d'eau ΔS_0 (pression

atmosphérique et température T_{FC}) par un flux molaire d'eau q_{H_2O} (A.8).

Modèle fluide

La partie fluide, modélisée par une analogie électrique, est composée de deux lignes (une pour l'alimentation en hydrogène et la seconde pour l'alimentation en air). Les pressions partielles sont imposées par les circuits d'alimentation, sur l'entrée de l'air, la pression est imposée par l'atmosphère, à la sortie, elle est imposée par la pile. L'Équation (A.15) implique que les échanges d'énergie thermique entre le gaz et la pile sont négligés. C_{th} en $Ws \cdot K^{-2}$ est la capacité thermique de la pile.

La Figure A.2 présente l'EMR du stack complet. Les trois parties principales du modèle présentées précédemment peuvent être facilement interconnectées grâce au principe de causalité physique dans les blocs d'accumulation, qui fixe les entrées et les sorties de chaque élément du système. L'environnement du système est représenté par les éléments de source de l'EMR. Sur la partie fluide, le débit des gaz sont imposés au système. La partie de refroidissement gère la température de la PEMFC. Le courant de la pile est déterminé par la charge électrique. Les entrées de commande sont les endroits où la partie de commande peut agir sur le système. Dans ce cas, le système est contrôlable par les auxiliaires.

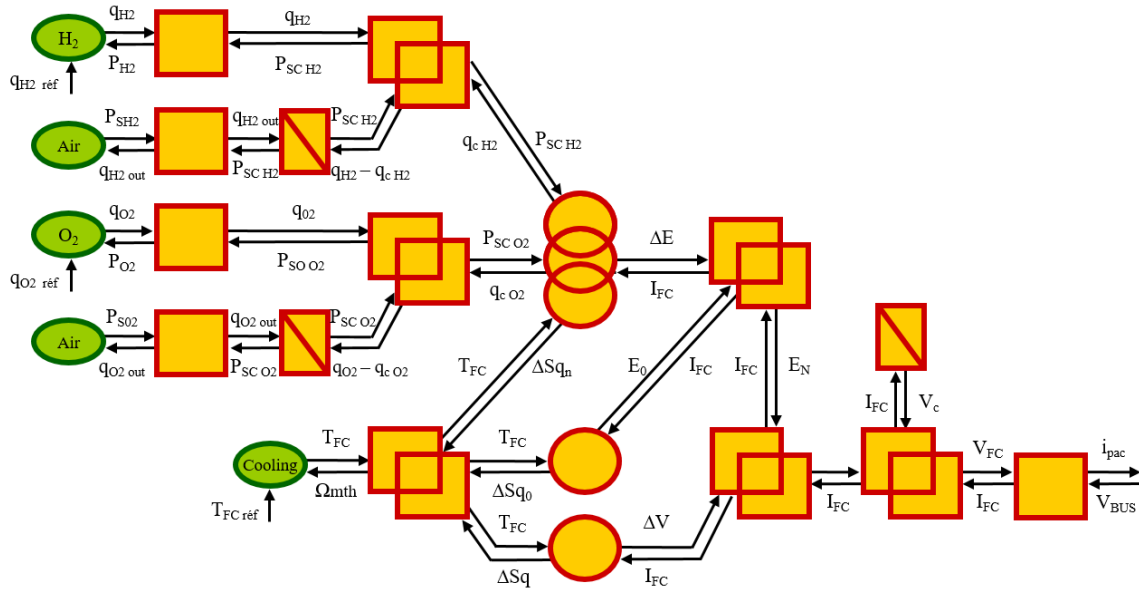


Figure A.2 – EMR système pile à combustible [6]

Tableau A.1 – Équations régissant le modèle de la PEMFC

Modèle électrochimique

$$E^{00} = \frac{-\Delta\bar{G}_f}{2F} = 1.23 \text{ V} \quad (\text{A.1})$$

$$\Delta E_P = A_{cd} \ln \frac{P_{scH_2}}{P^0} + B_{cd} \ln \frac{P_{scO_2}}{P^0} \quad (\text{A.2})$$

$$\Delta E_T = \alpha + \beta T_{FC} + \gamma T_{FC}^2 + \delta T_{FC}^3 + \nu T_{FC} \ln T_{FC} \quad (\text{A.3})$$

$$E_N = E^{TP} = E^{00} - \Delta E_P - \Delta E_T \quad (\text{A.4})$$

$$\Delta V_{act} = AT_{FC} \ln \left(\frac{I_{FC} + I_n}{I_0} \right) \quad (\text{A.5})$$

$$\Delta V_{conc} = BT_{FC} \ln \left(1 - \frac{I_{FC}}{I_l} \right) \quad (\text{A.6})$$

$$\Delta V_{ohm} = R_m I_{FC} \quad (\text{A.7})$$

$$V_{FC} = N_{cell_{FC}}(V_m + V_c) \text{ avec } I_{FC}(t) = C_{dl} \frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{V_c(t)}{R_t} \quad (\text{A.8})$$

Modèle thermique

$$E^0 = \frac{\Delta h}{2F} = 1.48 \text{ V} \quad (\text{A.9})$$

$$\Delta S_{q_{EC}} = \frac{N(E^0 - V_m)I_{FC}}{T_{FC}} \quad (\text{A.10})$$

$$\Delta S_{q_{H_2}} = 0 \text{ et } \Delta S_{q_{O_2}} = 0 \quad (\text{A.11})$$

$$\sum \Delta S_q = \Delta S_{q_{EC}} + \Delta S_{q_{H_2}} + \Delta S_{q_{O_2}} \quad (\text{A.12})$$

$$T_{FC} = \frac{1}{C_{th}} \int (\sum \Delta S_q - \Delta S_{q_{CW}}) \quad (\text{A.13})$$

Modèle fluidique

$$P_x = P_{scx} + R_{dx1} q_x \quad (\text{A.14})$$

$$q_{xout} = \frac{(P_{scx} - P_{sx})}{R_{dx2}} \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{dP_{scx}}{dt} = \frac{1}{C_h} (q_x - q_{cx} - q_{xout}) \quad (\text{A.16})$$

Annexe B

Liste de publications

Revue internationale

- R. E. Silva, L. Boulon, K. Agbossou, S. Jemeï, R. Gouriveau, D. Hissel, “Prognostics and Health Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems : a Survey of the State of the Art”, à soumettre dans : International Journal of Hydrogen Energy.
- R. E. Silva, F. Harel, S. Jemeï, R. Gouriveau, D. Hissel, L. Boulon, K. Agbossou, “Proton Exchange Membrane Fuel Cell Operation and Degradation in Short-Circuit”, dans : Fuel Cells Journal, Juillet 2014.
- R. E. Silva, R. Gouriveau, S. Jemeï, D. Hissel, L. Boulon, K. Agbossou, N. Yousfi Steiner, “Proton Exchange Membrane Fuel Cell degradation prediction based on Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems”, dans : International Journal of Hydrogen Energy, Juin 2014.

Communications dans des congrès internationaux

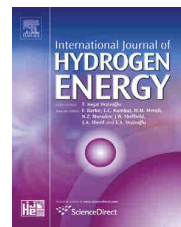
- E. Pahon, S. Jemeï, F. Harel, R. E. Silva, L. Oukhellou, D. Hissel, “k-Nearest Neighbours Fault Diagnosis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, dans : International Discussion on Hydrogen Energy and Applications IDHEA 2014, Nantes, France, 2014.
- R. E. Silva, F. Harel, S. Jemeï, R. Gouriveau, D. Hissel, L. Boulon, K. Agbossou, “Proton Exchange Membrane Fuel Cell Operation and Degradation in Short-Circuit”, dans : International Conference of Fundamentals & Development of Fuel Cells FDFC 2013, Karlsruhe, Allemagne, 2013.

Rapport technique

- R. E. Silva, F. Harel, S. Jemeï, D. Hissel. “Livrable 2.3 : rapport de caractérisation des piles de puissance”, Projet Français DIAPASON phase 2 – DIAGNOSTIC de Pile à combustible pour Applications automobiles et Stationnaires sans instrumentation, Octobre 2012.

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/hydro

Proton exchange membrane fuel cell degradation prediction based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems

R.E. Silva^{a,b,c,*}, R. Gouriveau^{a,b,d}, S. Jemei^{a,b}, D. Hissel^{a,b}, L. Boulon^c, K. Agbossou^c, N. Yousfi Steiner^e

^a FEMTO-ST Institute UMR CNRS 6174, Université de Franche-Comté, Techn'Hom, 90010 Belfort Cedex, France

^b FCLAB FR CNRS 3539, Techn'Hom, 90010 Belfort Cedex, France

^c IRH, Institut de Recherche sur l'Hydrogène, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 boul. des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières, Canada

^d ENSMM, National Engineering Institute in Mechanics and Microtechnologies, 26 Rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France

^e EIFER, European Institute for Energy Research, Emmy-Noether Str. 11, 76131 Karlsruhe, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 January 2014

Received in revised form

29 April 2014

Accepted 1 May 2014

Available online xxx

Keywords:

Proton exchange membrane fuel cell degradation

Prognostic and health management

Time-series prediction

Adaptive Neuro-Fuzzy Inference

System

ABSTRACT

This paper studies the prediction of the output voltage reduction caused by degradation during nominal operating condition of a PEM fuel cell stack. It proposes a methodology based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) which use as input the measures of the fuel cell output voltage during operation. The paper presents the architecture of the ANFIS and studies the selection of its parameters. As the output voltage cannot be represented as a periodical signal, the paper proposes to predict its temporal variation which is then used to construct the prediction of the output voltage. The paper also proposes to split this signal in two components: normal operation and external perturbations. The second component cannot be predicted and then it is not used to train the ANFIS. The performance of the prediction is evaluated on the output voltage of two fuel cells during a long term operation (1000 h). Validation results suggest that the proposed technique is well adapted to predict degradation in fuel cell systems.

Copyright © 2014, Hydrogen Energy Publications, LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Introduction

Fuel Cell Systems (FCS) and in particular Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) appears to be an alternative to reduce the dependence on fossil energy, one of the economic

and environmental challenges of modern society. The advantages of this technology include high efficiency, low emissions, fast system start-up ability, and high power density. However, they have several drawbacks such as complex water and heat management, intolerance to impurities in incoming gases and slow kinetics of oxygen reduction reaction. FCS are not yet ready

* Corresponding author. IRH, Institut de Recherche sur l'Hydrogène, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 boul. des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières, Canada.

E-mail address: silvasan@uqtr.ca (R.E. Silva).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.005>

0360-3199/Copyright © 2014, Hydrogen Energy Publications, LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.



Proton Exchange Membrane Fuel Cell Operation and Degradation in Short-Circuit[▲]

R. E. Silva^{1,2,3}, F. Harel^{2,4}, S. Jemei^{1,2*}, R. Gouriveau^{1,2,5}, D. Hissel^{1,2}, L. Boulon³, K. Agbossou³

¹ FEMTO-ST Institute UMR CNRS 6174, Université de Franche-Comté, Techn'Hom 90010 Belfort Cedex, France

² FCLAB FR CNRS 3539, Techn'Hom 90010 Belfort Cedex, France

³ IRH, Institut de Recherche sur l'Hydrogène, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Canada

⁴ IFSTTAR, Université de Lyon, 25 Avenue François Mitterrand, Case 24, Cité des mobilités, F-69675 Bron Cedex, France

⁵ ENSMM, National Engineering Institute in Mechanics and Microtechnologies, 26 Rue de l'Épitaphe 25000 Besançon, France

Received September 30, 2013; accepted July 22, 2014; published online ■■■

Abstract

Hybridization of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) and ultra capacitors (UC) are considered as an alternative way to implement high autonomy, high dynamic, and reversible energy sources. PEMFC allow high efficiency and high autonomy, however their dynamic response is limited and this source does not allow recovering energy. UC appears to be a complementary source to fuel cell systems (FCS) due to their high power density, fast dynamics, and reversibility. A direct hybridization of these sources could allow reducing the number of power converters and then the total cost of the hybridized system. Simulations show the behavior of the hybrid source when the fuel cell and ultra

capacitors are interconnected and the natural energy management when a charge is connected. The results show that the magnitude of the transient current supplied by the fuel cell to charge the UC can be much higher than its nominal value. An experimental setup is implemented to study the effects of these high currents in a PEMFC. This is done by imposing a controlled short-circuit between the electrodes. The PEMFC degradation is quantified by using electrochemical impedance spectroscopy.

Keywords: Degradation, Passive Hybridization, Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Short-Circuit, Start-up, Ultra capacitors

1 Introduction

Fuel cell systems (FCS), and in particular, proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) are interesting energy sources because of their high efficiency, low emissions, and high energy density. However, the dynamic response of the FCS is limited by the gas supply and then the FCS are very constrained to supply high dynamic power loads, moreover FCS are not able to recover energy (regenerative braking in vehicular application for instance) [1–5]. Ultra capacitors (UC) appear as an interesting complementary source to FCS due to their high power density, fast charge/discharge abilities, and reversibility [2, 5–7]. However, UC cannot be used as unique source because of their limited energy storage capability. Fuel

cells in combination with ultra capacitors can be used for satisfying energy efficiency and dynamic response of applications such as vehicle traction where UC would enable recovering braking energy, and mitigates the stress on the fuel cell [8–10].

Fuel cell and ultra capacitors can be hybridized using either active or passive architectures. Active hybrid architectures require at least one DC/DC converter to perform energy management [5, 11–13]. The presence of the power converters generally increases the energy losses, the volume, the weight and the cost of the hybrid source [6, 12]. In passive hybrid architectures, the fuel cell and the ultra capacitors are directly connected to the DC bus without using a power converter [5, 11, 13]. In this architecture, the ultra capacitors absorb the excess power from the stack, not only allowing regenerative braking but also providing a fraction of transient power for vehicle acceleration [6, 10].

[▲] Paper presented at the “Fundamentals & Developments of Fuel Cells Conference 2013 (FDFC2013)”, April 16–18, 2013, Karlsruhe, Germany.

[*] Corresponding author, samir.jemei@univ-fcomte.fr

Abstract:

This thesis work aims to provide solutions for the limited lifetime of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems (PEM-FCS) based on two complementary disciplines:

A first approach consists in increasing the lifetime of the PEM-FCS by designing and implementing a Prognostics & Health Management (PHM) architecture. The PEM-FCS are essentially multi-physical systems (electrical, fluid, electrochemical, thermal, mechanical, etc.) and multi-scale (time and space), thus its behaviors are hardly understandable. The nonlinear nature of phenomena, the reversibility or not of degradations and the interactions between components makes it quite difficult to have a failure modeling stage. Moreover, the lack of homogeneity (actual) in the manufacturing process makes it difficult for statistical characterization of their behavior. The deployment of a PHM solution would indeed anticipate and avoid failures, assess the state of health, estimate the Remaining Useful Lifetime (RUL) of the system and finally consider control actions (control and/or maintenance) to ensure operation continuity.

A second approach proposes to use a passive hybridization of the PEMFC with Ultra Capacitors (UC) to operate the fuel cell closer to its optimum operating conditions and thereby minimize the impact of aging. The UC appear as an additional source to the PEMFC due to their high power density, their capacity to charge/discharge rapidly, their reversibility and their long life. If we take the example of fuel cell hybrid electrical vehicles, the association between a PEMFC and UC can be performed using a hybrid of active or passive type system. The overall behavior of the system depends on both, the choice of the architecture and the positioning of these elements in connection with the electric charge. Today, research in this area focuses mainly on energy management between the sources and embedded storage and the definition and optimization of a power electronic interface designated to adjust the flow of energy between them. However, the presence of power converters increases the source of faults and failures (failure of the switches of the power converter and the impact of high frequency current oscillations on the aging of the PEMFC), and also increases the energy losses of the entire system (even if the performance of the power converter is high, it nevertheless degrades the overall system).

Keywords: proton exchange membrane fuel cell, prognostics and health management, passive hybridization, ultra capacitors, data driven approach, adaptive neuro fuzzy inference system.

The logo for the École doctorale SPIM, featuring a stylized 'S' followed by the letters 'PIM' in a large, white, sans-serif font.